



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Renata Mansuelo Alves Domingos

**Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração
fotovoltaica em habitações de interesse social**

Florianópolis
2020

Renata Mansuelo Alves Domingos

**Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração
fotovoltaica em habitações de interesse social**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira,
Ph.D.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Domingos, Renata Mansuelo Alves

Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em habitações de interesse social / Renata Mansuelo Alves Domingos ; orientador, Fernando Oscar Ruttkay Pereira, 2020.
89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Custo do Ciclo de Vida . 3. Eficiência Energética em edificações. 4. Sistema Fotovoltaico integrado em edificações. I. Pereira, Fernando Oscar Ruttkay . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Renata Mansuelo Alves Domingos

Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em habitações de interesse social

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Eduardo Leite Krüger, Ph.D.

Instituição UTFPR

Prof. Ricardo Rütther, Ph.D.

Instituição UFSC

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Instituição UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D.

Orientador

Florianópolis, 2020.

Este trabalho é dedicado aos meus mestres, os primeiros da minha vida, que são os meus pais, e aos professores que me ensinaram desde a alfabetização até o ensino superior.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo fôlego de vida e por ter me permitido chegar até aqui. Aos meus pais, Nicodemos e Eulina, que nunca mediram esforços para que eu pudesse ter acesso à melhor educação possível, pelo apoio e incentivo que me possibilitou a dedicação exclusiva à carreira acadêmica, por serem o meu amparo e base.

Ao meu orientador e mentor professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira, que aceitou me orientar e me guiar nesse processo. Pelo tempo disponibilizado a mim, pelos conselhos, discussões, posicionamentos e diretrizes dadas que fizeram com que a realização dessa pesquisa fosse possível.

Aos professores que participaram das minhas bancas, professor Eduardo Leite Krüger, professor Ricardo Rütther, professor Roberto Lamberts e professor Deivis Luis Marinoski, pelo tempo dedicado, pelas correções, críticas e sugestões concedidas.

Ao meu primeiro mentor na pesquisa, que hoje se tornou um parceiro profissional e amigo, João Sanches, obrigada pelo apoio, incentivo e orgulho demonstrado desde a aprovação do mestrado até a defesa. Tenho que agradecer também por ter me apresentado a Emeli, pessoa cuja parceria também vai além do profissional. À Emeli, obrigada pelo apoio ao longo desses anos, as noites de escrita juntas, as conversas e conselhos. Obrigada pela amizade e por dividir não só a casa comigo, mas também a responsabilidade do nosso cachorro (Fanger).

Aos meus amigos, agradeço pelo apoio emocional e compreensão pelas horas não dedicadas à minha vida social. Muitos foram importantes nessa caminhada, mas citarei alguns que me foram essenciais. À Anna, que foi fundamental para o meu processo de adaptação no início do mestrado, pelo amparo emocional e psicológico durante esses anos. E é claro que não poderia deixar de agradecer por todas as revisões e ajudas ortográficas concedidas. Aos meus amigos da graduação, Antonella, Camila, Haila, Luana e Lucas, que me aceitam, incentivam e apoiam sempre, pessoas que a faculdade me apresentou e que levarei para a vida. Agradeço à Júlia, que a escola me proporcionou conhecer quando éramos ainda crianças e, mesmo com o passar dos anos e a distância física entre nós impossibilitando um abraço, você sempre esteve presente e disponível, acompanhando os dramas desde a adolescência até hoje, obrigada por tudo. Agradeço à Ana Luiza que entrou na minha vida no final dessa caminhada, mas me deu suporte e apoio para lidar com essa fase crítica e estressante, obrigada pelo carinho e paciência comigo.

Agradeço aos meus companheiros de pesquisa, muitos dias e noites foram passados dentro do Labcon e isso gera conexão para além do profissional. Agradeço a todos que dividiram aquele ambiente comigo nesses anos, mas especialmente a Alexandra, Emeli, Mayna, Mônica e Vinicius, e agradeço a Emeli e o Vinicius, também, pela ajuda com as simulações.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pela estrutura, ao Labcon e o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Não aceito mais as coisas que não posso mudar, estou mudando as coisas que não posso aceitar. (DAVIS, 1981)

RESUMO

Os edifícios consomem mais de um terço da energia primária no mundo. Parte dessa eletricidade é desperdiçada devido à ineficiência energética dessas edificações. Essa demanda energética pode ser mitigada por meio da geração de energia elétrica. Dentro desse cenário, existem duas abordagens para a questão da demanda de energia nos edifícios: gerar mais energia de forma limpa e renovável ou diminuir o consumo de energia das edificações por meio de estratégias de eficiência energética. A questão abordada é até onde ir com as medidas de conservação de energia e eficiência em termos de custo benefício. Nesse contexto, o objetivo geral é comparar o consumo de energia e a geração fotovoltaica distribuída em habitações de interesse social unifamiliares, pelo viés da relação custo x benefício. Para isso, a metodologia adotada foi de calcular o custo do ciclo de vida de uma casa com 45m² situada em Florianópolis, cidade com clima subtropical classificado como mesotérmico úmido. Utilizou-se para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos o valor do consumo referente à porcentagem do consumo evitado com as medidas de eficiência energética aplicadas, comparando, dessa forma, o rendimento e a viabilidade econômica das duas medidas. Quando as medidas de eficiência energética foram aplicadas de forma isolada, a medida com maior proporção de influência foram: os sistemas construtivos das paredes (variação de 56%), em segundo lugar a orientação (variação de 24%) e terceiro lugar a eficiência do ar condicionado (variação de 13%). A análise do impacto das medidas nos custos da casa demonstrou que o sistema construtivo das paredes obteve maior expressão conforme esperado, no entanto as duas outras medidas com maior influência no consumo apresentaram 0% e 0,20%, sendo os menores valores. No custo do ciclo de vida o consumo de energia é considerado e quando combinadas as medidas de eficiência energética a economia de energia se intensifica e o custo do ciclo de vida vai aumentando ou diminuindo de acordo com as medidas aplicadas. Dentro dos 576 modelos foram escolhidos dois modelos para a análise comparativa de eficiência energética com sistemas fotovoltaicos, o modelo com menor custo e o modelo com maior economia de energia. Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico foi estimada a energia economizada com as medidas de eficiência. A comparação entre os sistemas foi realizada em quatro cenários diferentes, a taxa de juros, considerada a taxa de atratividade mínima, foi a Selic de 4,5% e 9,5% e o aumento de energia de 5% e 10%. A avaliação foi realizada por meio de três indicadores, o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o payback. O VPL não demonstrou ser rentável do ponto de vista financeiro às estratégias de eficiência em três cenários. O único cenário com VPL positivo foi no cenário aonde a taxa de juros é baixa e o aumento da energia alto. No caso do sistema fotovoltaico apenas um cenário não demonstrou viabilidade, o cenário com juros altos e baixo aumento no preço da energia. A TIR demonstrou viabilidade das medidas de eficiência energética no cenário com aumento do preço da energia, enquanto o sistema fotovoltaico teve a TIR maior que a taxa mínima considerada em todos os cenários. Pelo conceito clássico do payback todos os cenários, tanto para o uso das medidas de eficiência quanto dos sistemas fotovoltaicos os períodos de retorno foram menores que 25 anos. Com essa pesquisa conclui-se que quando tratados como concorrentes pelo ponto de vista financeiro o sistema fotovoltaico apresenta melhor performance nos indicadores, sendo o mais conveniente para aplicação isolada. No entanto a pesquisa mostra como medidas com baixo ou nenhum custo podem economizar uma quantidade significativa de energia, devendo sempre esses fatores serem levados em consideração na fase de projeto.

Palavras-chave: Custo do ciclo de vida. Economia de energia. Sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

Buildings consume more than a third of the world's primary energy. Part of that electricity is wasted due to the energy inefficiency of these buildings. This energy demand can be mitigated through the generation of electricity. Within this scenario, there are two approaches to the issue of energy demand in buildings: generating more energy in a clean and renewable way or reducing the energy consumption of buildings through energy efficiency strategies. The question addressed is how far to go with energy conservation and cost-effective measures. In this context, the general objective is to compare energy consumption and photovoltaic generation distributed in single-family in houses low-cost, through the cost-benefit ratio. For that, the methodology adopted was to calculate the life cycle cost of a 45m² house located in Florianópolis, a city with subtropical climate classified as humid mesothermal. For the dimensioning of photovoltaic systems, the consumption value referring to the percentage of avoided consumption with the applied energy efficiency measures was used, thus comparing the performance and economic viability of the two measures. When the energy efficiency measures were applied in isolation, the measure with the greatest proportion of influence was: the building systems of the walls (56% variation), secondly the orientation (24% variation) and thirdly the efficiency of the wall. air conditioning (variation of 13%). The analysis of the impact of the measures on the costs of the house showed that the construction system of the walls obtained greater expression as expected, however the two other measures with greater influence on consumption presented 0% and 0.20%, with the lowest values being. In the life cycle cost, energy consumption is considered and when combined with energy efficiency measures, energy savings are intensified and the life cycle cost increases or decreases according to the measures applied. Among the 576 models, two models were chosen for the comparative analysis of energy efficiency with photovoltaic systems, the model with the lowest cost and the model with the greatest energy savings. For the dimensioning of the photovoltaic system, the energy saved with the efficiency measures was estimated. The comparison between the systems was carried out in four different scenarios, the interest rate, considered the minimum attractiveness rate, was the Selic rate of 4.5% and 9.5% and the energy increase of 5% and 10%. The assessment was carried out using three indicators, the Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and the payback. NPV did not prove to be profitable from a financial point of view to efficiency strategies in three scenarios. The only scenario with positive NPV was in the scenario where the interest rate is low and the increase in energy is high. In the case of the photovoltaic system, only one scenario did not demonstrate viability, the scenario with high interest rates and a low increase in the price of energy. The IRR demonstrated the viability of energy efficiency measures in the scenario with an increase in the price of energy, while the photovoltaic system had an IRR higher than the minimum rate considered in all scenarios. According to the classic payback concept, all scenarios, both for the use of efficiency measures and for photovoltaic systems, the payback periods were less than 25 years. With this research it is concluded that when treated as competitors from the financial point of view, the photovoltaic system presents better performance in the indicators, being the most convenient for isolated application. However, research shows how low or no cost measures can save a significant amount of energy, and these factors should always be taken into account in the design phase.

Keywords: Life Cycle Cost. Energy Saving. Photovoltaic System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidades Consumidoras com Geração Distribuída e Potência Instalada..	16
Figura 2 - Projeção da média ponderada global dos custos totais instalados de sistemas fotovoltaicos de 2009 até 2025.	17
Figura 3 - Curva de viabilidade econômica para isolamento de paredes	25
Figura 4 - Efeito da espessura do isolamento no custo para a província de Malatya (Turquia). a - chapa de fibra de madeira; b - laje de lã de madeira; c - perlite expandida; d - cortiça expandida.....	26
Figura 5 - Efeito da espessura do isolamento no custo para a província de Ardahan (Turquia) a - chapa de fibra de madeira; b - laje de lã de madeira; c - perlite expandida; d - cortiça expandida.....	27
Figura 6 - Custo de aquecimento para edifícios isolados versus espessura de isolamento.....	28
Figura 7 - Consumo de energia vs emissões de CO ₂ (a1) e custo de investimento inicial (b1); emissões de CO ₂ vs consumo de energia (a2) e custo de investimento inicial (b2); custo de investimento inicial vs consumo de energia (a3) e de libertação de emissões de CO ₂	29
Figura 8 - Custo do ciclo de vida	31
Figura 9 - Caso ótimo residencial para a cidade de Riyadh	31
Figura 10 - Custo do ciclo de vida de uma residência em Bahrein	32
Figura 11 - Diagrama da metodologia.....	41
Figura 12 - Projeto Arquitetônico do edifício referencial	43
Figura 13- Padrões de ocupação e do sistema de iluminação para dias de semana e finais de semana.....	47
Figura 14 - Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial.	48
Figura 15- Diagrama da comparação entre os custos da aplicação de EE e FV em uma casa	52
Figura 16 - Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Norte	53
Figura 17- Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Sul	53
Figura 18 - Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Leste.....	54
Figura 19- Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Oeste	54

Figura 20 - Consumo no ciclo de vida	55
Figura 21 - Economia do consumo referente ao modelo base	56
Figura 22 - Economia do consumo referente ao modelo base da orientação	58
Figura 23 - Economia do custo da casa referente ao modelo base.....	60
Figura 24 - Economia do CCV referente ao modelo base.....	61
Figura 25 - Valores absolutos do consumo e CCV	62
Figura 26 - Valores absolutos do consumo e CCV (marcado).....	63
Figura 27 - Valores absolutos de CCV e consumo de energia (modelo referencial, menor CCV e maior economia de energia).	64
Figura 28 - VPL: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico	66
Figura 29 - TIR: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico	67
Figura 30 - Payback: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos objetivos e atividades a seres executadas	42
Tabela 2 - Categorias das medidas de EE	44
Tabela 3 - Sistema numérico dos modelos.....	45
Tabela 4 - Padrão de uso e densidade de cargas internas de equipamentos.....	47
Tabela 5 - Taxas metabólicas para cada atividade	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Anuidade Equivalente
AIJ	Área Ideal de Janela
AC	Ar Condicionado
CCV	Custo de Ciclo de Vida
EE	Eficiência Energética
FV	Energia Fotovoltaica
EUA	Estados Unidos da América
PVC	Policloreto de Vinila
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	20
2.1.1	Métodos de análise econômica de medidas de EE	21
2.1.2	Estudos de Caso de viabilidade financeira para melhoria de EE	25
2.1.3	Realidade das pesquisas brasileiras	33
2.2	INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ÀS EDIFICAÇÕES	36
2.2.1	Estudos de Caso no Brasil.....	38
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	DETERMINAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERENCIAL	42
3.2	APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE EE	44
3.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	46
3.3.1	Simulação do edifício.....	46
3.3.2	Simulação do sistema FV	49
3.4	CUSTO DA EDIFICAÇÃO PELO CICLO DE VIDA	49
3.5	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E SENSIBILIDADE DO MERCADO PARA TAXAS DE JUROS, VARIAÇÃO DOS PREÇOS DA ENERGIA E OUTROS PARÂMETROS	50
3.6	COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO ECONÔMICA	51
4	RESULTADOS	53
4.1	ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA.....	53

4.2	ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA	59
4.3	ANÁLISE ECONOMICA COMPARATIVA ENTRE FV E EE	65
5	CONCLUSÃO.....	70
5.1	LIMITAÇÕES	71
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A – Propriedade dos sistemas construtivos	79
	APÊNDICE B – Dados de consumo e custo dos modelos	80

1 INTRODUÇÃO

Ter um abastecimento energético seguro e sustentável é um dos maiores desafios que a nossa sociedade enfrenta no século XXI. O crescimento populacional e aumento dos padrões de vida, pressionam as matrizes existentes. Dessa forma, o acréscimo da procura por energia, quando não pensada de forma limpa e sustentável, contribuirá para os efeitos negativos sobre a qualidade de vida e o ambiente. Ou seja, a forma como são escolhidos e distribuídos os recursos energéticos afetará as condições econômicas e climáticas no futuro.

Tais escolhas também atingirão o limite ou avanço do aquecimento global (GELLER et al., 2004; ABU BAKAR et al., 2015). Nesse contexto, os governos estão tomando providências na tentativa de impedir essa tendência. O uso e a geração de energia são os principais responsáveis pela produção de gases do efeito estufa. Os edifícios consomem cerca de 40% da energia primária do mundo, sendo o setor que mais consome energia (International Energy Agency; Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009). No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2018), o setor residencial consome cerca de 25% do total de energia consumida no país.

Holmes e Hacker (2007) mostraram que o atual desafio dos profissionais da construção é projetar edifícios com baixo consumo, ainda proporcionando conforto ambiental. Esses edifícios são aqueles que contam com estratégias passivas, diminuindo, assim, a demanda de refrigeração, iluminação, aquecimento e equipamentos, reduzindo o consumo e alcançando o conforto térmico no interior das edificações (KAYNAKLI, 2012; RODRIGUEZ-UBINAS et al., 2014). Fatores que podem estar associados à eficiência e ao seu impacto na economia de energia são: comportamento humano, custo inicial das medidas e as propriedades físicas das habitações (HAMILTON et al., 2016).

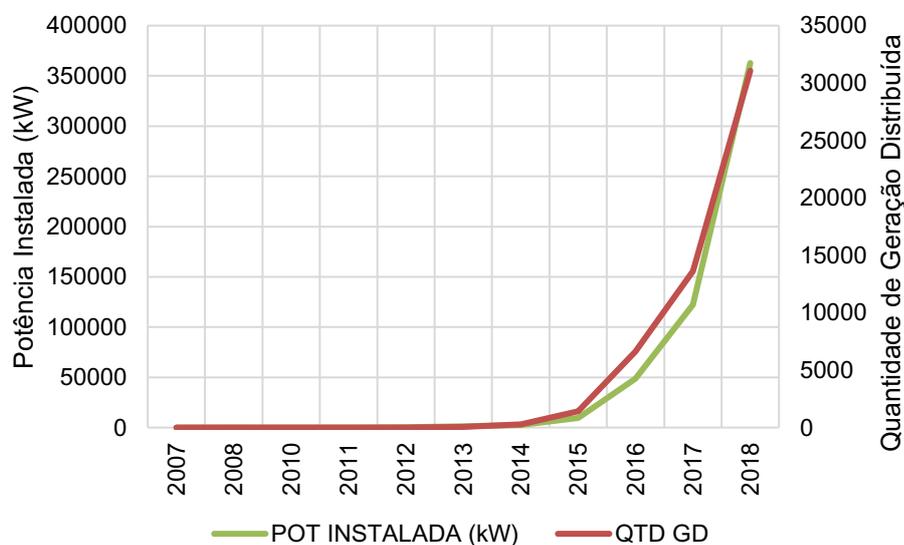
Segundo Tonn e Peretz (2007), programas de medidas de eficiência energética residenciais podem reduzir potencialmente o uso da energia em 20%. Entretanto, existem dificuldades para implementar as medidas de eficiência. Tonn e Peretz (2007) identificaram quatro tipos gerais de barreiras, que são: conscientização, custo, capacitação e problemas de transação. O primeiro se refere à falta de conscientização sobre as oportunidades de economia de energia; o segundo são os altos investimentos que eventualmente são necessários; a terceira barreira são os profissionais da área de construção civil que não aplicam as estratégias por falta de conhecimento ou incentivo, e a última barreira engloba questões como falta de confiança, ineficiências organizacionais e outros pontos que não entram nas três anteriores.

Jensen et al. (2018) dividiram em cinco categorias as principais barreiras: barreiras institucionais e políticas; barreiras do mercado e econômicas; barreiras financeiras; barreiras técnicas e barreiras comportamentais e sociais. De acordo com de La Rue du Can et al. (2014), uma das barreiras mais significativas é o custo inicial relativamente alto que as medidas de eficiência energética podem apresentar. Mesmo sendo um investimento com retorno ao longo da vida útil, por diminuir o consumo, a maioria dos consumidores valoriza muito as economias imediatas e diminui a importância das economias futuras.

Dadas as barreiras existentes para o investimento em eficiência energética, é interessante comparar o aumento do uso das medidas de eficiência com o aumento da participação de energias renováveis, entre elas, a geração distribuída renovável (ALMEIDA & FERREIRA, 2018). Os recursos de energia distribuída são tecnologias modulares de energia, instaladas e operadas pelos usuários em edifícios, como as energias eólica e fotovoltaica produzidas in loco (AKOREDE et al., 2010; ALANNE & SAARE, 2006; HAMILTON et al., 2016). Dessa forma, a energia renovável distribuída e a eficiência energética tem sido vistas como parceiros-chave para um futuro energético mais sustentável (SOLANGI et al., 2011).

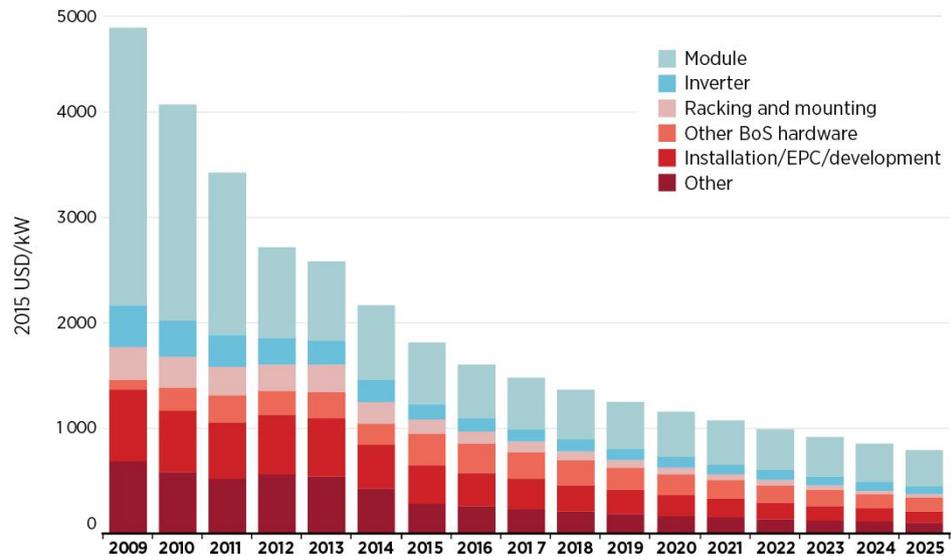
O uso de energia fotovoltaica tem crescido de forma exponencial nos últimos anos (Figura 1). Com a popularização, o custo de painéis fotovoltaicos tem caído drasticamente na última década (Figura 2) (BAZILIAN et al., 2013; CANDELISE et al., 2013). A integração de painéis fotovoltaicos nas fachadas e telhados dos edifícios é considerada como uma solução ideal para o problema do aumento do consumo dos edifícios (JONES et al. 2017).

Figura 1 - Unidades Consumidoras com Geração Distribuída e Potência Instalada



Fonte: Adaptado de Aneel (2019)

Figura 2 - Projeção da média ponderada global dos custos totais instalados de sistemas fotovoltaicos de 2009 até 2025.



Fonte: IRENA (2016)

No setor de eletrodomésticos, avanços significativos foram alcançados no desenvolvimento de sistemas de aquecimento e resfriamento mais eficientes. Isso contribuiu para melhorar os padrões de desempenho dos edifícios e reduzir o consumo de energia primária por unidade de produção econômica (TONN & PERETZ, 2007). Dessa forma, os sistemas de Energia Fotovoltaica (FV) e medidas de Eficiência Energética (EE) também podem ser vistos como concorrentes econômicos na última década (OLIVA H, 2017).

Entre os benefícios econômicos que os sistemas fotovoltaicos e medidas de eficiência podem criar, se inclui: a geração de energia evitada (menor demanda de energia) com o uso de medidas de eficiência energética e a geração de energia limpa na instalação de painéis fotovoltaicos, além de evitar investimentos na rede a partir do suprimento de energia centralizado, como a construção de novas usinas. A magnitude dos benefícios de FV e EE pode diferir muito, dependendo das características específicas de sua instalação e operação (OLIVA H, 2017). A análise da relação custo-benefício de uma determinada medida é feita usando uma análise onde a vida útil do edifício ou período na qual a renovação está sendo planejada deve ser avaliada usando o custo do ciclo de vida. Dessa forma, os custos e benefícios de cada alternativa são analisados ao longo do tempo de vida e expressos por meio do valor presente líquido, incluindo os custos de investimento, da energia, custos de operação e manutenção (ALMEIDA & FERREIRA, 2018).

A questão levantada por essa pesquisa é comparar FV e EE como concorrentes em relação ao custo-benefício para residências entre os dois sistemas. A partir dos requisitos mínimos de desempenho ambiental da edificação, pode-se encontrar qual situação leva ao menor custo durante o ciclo de vida econômico estimado. No entanto, eles também podem e devem ser usados de forma conjunta, por isso a presente pesquisa pretende analisar as duas situações, comparar os investimentos de forma a tratá-los como concorrentes, usando as medidas de eficiência de forma isolada e painéis fotovoltaicos igualmente, e de forma integrada, como é aplicado na maioria das vezes. A questão chave abordada é até onde ir com as medidas de conservação de energia e eficiência em termos de benefícios econômicos.

Para análises econômicas, deve-se considerar não apenas as condições térmicas do edifício, mas as condições climáticas, preços da energia, localização, recursos disponíveis e outros fatores. O desafio é encontrar as estratégias que resultam no desempenho mínimo da edificação com o menor custo possível (MORAN et al., 2017; TOLEIKYTE et al., 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar a relação custo x benefício entre a minimização do consumo de energia e a geração de energia fotovoltaica distribuída em habitações de interesse social unifamiliares.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar o potencial de economia de energia que pode ser atingido por meio da implementação de medidas projetuais de mitigação do consumo de energia em uma residência de baixo padrão no Brasil.
- Avaliar o custo das medidas de eficiência energética e a relação com o custo do consumo evitado por elas, de forma isolada;
- Avaliar os diferentes cenários de demanda de energia para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos;
- Avaliar os custos do ciclo de vida das medidas de eficiência energética e dos sistemas fotovoltaicos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação compõe-se de cinco capítulos.

O capítulo 1, denominado Introdução, compreende a apresentação do assunto tratado, com enfoque nos conceitos que subsidiam a definição do objetivo geral e dos objetivos específicos.

No capítulo 2, a Fundamentação Teórica propõe-se a apresentar um aprofundamento da temática eficiência energética em edificações. Em seguida, abordam-se estudos de casos de viabilidade financeira para eficiência energética e a realidade brasileira em pesquisas relacionadas à temática. É abordado, após isso, a integração dos painéis FV integrados à edificação e os estudos de caso realizados no Brasil com a temática.

No capítulo 3, denominado Metodologia, apresenta-se um diagrama da pesquisa. Escolhe-se como objeto de estudo uma habitação padrão, construída em Florianópolis-SC, definindo-se as suas propriedades termofísicas e as tipologias das aberturas. São descritas, ainda, as medidas de EE que são aplicadas no modelo referencial, o método de cálculo dos custos, viabilidade econômica e como são comparadas as medidas de EE e sistemas FV.

No capítulo 4, são descritos os Resultados que foram divididos em seções. A primeira traz a análise do consumo dos modelos verificando a influência das estratégias propostas de forma isolada. A segunda analisa os custos no ciclo de vida também verificando a influência das estratégias propostas de forma isolada e posteriormente a sua relação com o consumo de energia. A terceira é a viabilidade econômica dos modelos escolhidos comparado com a implantação do sistema FV. Em resumo a primeira e segunda parte analisa o custo benefício da aplicação de medidas de EE e a terceira compara a viabilidade econômica das dessas medidas com o uso de painéis fotovoltaicos.

No capítulo 5, a Conclusão recapitula os pontos mais importantes dos resultados, conclui as análises e traz as limitações e sugestões da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

A eficiência energética funciona como parâmetro que indica o menor nível de uso de energia para executar uma tarefa associada ao produto final desejado (ABU BAKAR et al., 2015), que abrange uma ampla gama de tecnologias, processos e até mesmo mudanças de comportamento. Nesse contexto, diversos programas de eficiência focam em conscientização, em incentivos financeiros para compra de aparelhos energeticamente eficientes, enquanto outros são voltados ao setor da construção civil (TONN & PERETZ, 2007). A melhoria da EE surge como uma solução viável e sustentável para os desafios do controle do crescimento da demanda de energia, pois atrelado ao uso racional da energia são essenciais para o planejamento de um país, possibilitando diminuir o consumo de energia e aumentar a competitividade (SILVERO et al., 2019). Sendo assim, as medidas de melhoria de eficiência energética desempenham um papel importante no controle do uso de energia, bem como na redução de custos e manutenção de ambientes confortáveis em edifícios (ABU BAKAR et al., 2015).

No setor residencial, a demanda energética está relacionada principalmente com o clima, o projeto arquitetônico, os sistemas de energia, com o uso e o nível econômico dos ocupantes. Em geral, as residências nos países desenvolvidos usam mais energia do que as das economias emergentes, e espera-se que o consumo de energia continue crescendo devido à instalação de novos aparelhos, principalmente aparelhos de ar condicionado (AC) (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008). Edifícios com baixo desempenho térmico resultam em desconforto para os usuários e à medida que sua renda aumenta, os ocupantes optam pelo uso do condicionamento artificial, aumentando o custo operacional do edifício e as emissões de CO₂. O aumento do uso do ar condicionado em todo o país significaria a necessidade de o país expandir sua infraestrutura energética (TRIANA et al., 2018).

Apesar do fato de que o uso de sistemas de ar condicionado para resfriamento ainda é limitado no Brasil, seu uso representa cerca de 20% do consumo de eletricidade em habitações (TUBELO et al., 2018). Espera-se que o aumento da renda e do padrão de vida aumente seu uso, pois estará dentro do alcance econômico. Os sistemas de condicionamento mais utilizados no Brasil são os sistemas de condicionamento de ar elétricos, que impactam consideravelmente as contas de energia, portanto, as famílias com baixo poder aquisitivo podem sofrer desconforto significativo. Isso pode ter impacto na produtividade, bem-estar,

habilidades de aprendizado, etc., o que afeta as atividades do dia-a-dia. Por causa de todos esses fatores, a entrega de casas termicamente confortáveis que exigem menos uso de energia para alcançar o conforto térmico é desejada especialmente para essas famílias de baixa renda (TUBELO et al., 2018). Nesse contexto, investir em edifícios para que melhorem a qualidade ambiental e, conseqüentemente, a qualidade de vida dos usuários tem sido imprescindível. Além disso, é importante que se trabalhe com preços acessíveis para alcançar as famílias de baixa renda. A junção dessas premissas é o que configura uma proposta sustentável, onde o ambiente, o social e o econômico andam em conjunto (JENSEN et al., 2018).

2.1.1 Métodos de análise econômica de medidas de EE

É fácil entender os benefícios energéticos e ambientais resultantes da aplicação das medidas de eficiência energética, tais como economia de energia, diminuição da emissão de gases poluentes, preservação do meio ambiente, entre outros. No entanto, os inquilinos e proprietários veem os custos com medidas de EE como um acréscimo indesejável à moradia na fase de compra e, além disso, não dão atenção aos custos futuros de gerenciamento. Para dificultar, os custos evitados no consumo de energia nem sempre são levados em conta no momento da compra. (OUYANG et al., 2009).

Os preços dessas medidas de eficiência energética continuam a ser o fator-chave. Segundo Tokarik et al. (2016), em um questionário a empreiteiros de edifícios residenciais, os custos de materiais de construção de alto desempenho e os custos de qualificação dos profissionais foram os obstáculos mais significativos para uma construção eficiente em termos energéticos. Outros fatores importantes são os custos de combustível e os benefícios não energéticos (KARÁSEK et al., 2018; TOKARIK et al., 2016).

Essa percepção considera principalmente o custo inicial e não considera a redução do consumo e conseqüente recuperação do valor investido. Em geral, entende-se que os maiores custos iniciais de capital associados à inclusão de medidas de conservação de energia resultam em contas de energia reduzidas, que podem devolver esse investimento no longo prazo.

Segundo Tonn e Peretz (2007), existe uma quantidade substancial de energia que pode ser salva na fase de concepção projetual. Estudos sugerem que o consumo de energia pode ser reduzido em pelo menos 20% com diretrizes de baixo custo. Economizar energia irá beneficiar economicamente os consumidores, desde moradores até estabelecimentos comerciais, indústrias e instituições. Nos Estados Unidos da América (EUA), muitos estados estão tratando o uso das medidas de eficiência energética como uma oportunidade de

desenvolvimento econômico. Com o aumento dos preços da energia e sem nenhum alívio à vista, é fácil argumentar que o uso de medidas energeticamente eficientes só crescerá no futuro (TONN & PERETZ, 2007).

Liang Wong e Krüger (2017) afirmam que a economia potencial de energia, normalmente considerado o único benefício financeiro, não motiva suficientemente os investimentos. Desta maneira, os investimentos em medidas de eficiência energética nas edificações agregarão valor aos edifícios e poderão ser pagos dentro de um determinado período. Conforme os autores, pesquisas sobre a temática discutida são recentes, principalmente em relação aos cálculos do valor acrescentado no tocante ao emprego de estratégias de desempenho energético; assim, os autores apresentam uma metodologia para quantificar esse aumento.

Os resultados da pesquisa segundo Liang Wong e Krüger (2017) sobre os condomínios existentes demonstraram que os preços de transação dos apartamentos com retrofits térmicos foram 2% a 3% mais altos do que aqueles sem retrofits. Os autores, no entanto, não levantaram o valor do investimento desse retrofit. É difícil quantificar ou calcular as vantagens financeiras dos edifícios comerciais em termos de preço de venda, uma vez que a maioria dos edifícios comerciais possui suas características próprias, sendo, portanto, difícil de comparar.

Em todas as circunstâncias, as medidas relacionadas com a eficiência energética devem considerar clima da região de implantação e a rentabilidade dessas medidas. Nesse sentido, são utilizadas diferentes metodologias de cálculo do desempenho energético, conduzindo a indicadores numéricos que não são comparáveis entre si, mesmo quando são pesquisas do mesmo cenário (FERREIRA et al., 2016).

A premissa básica para se ter viabilidade financeira é os custos dos investimentos serem menor ou igual ao valor líquido da economia (DODOO et al., 2017). A maioria das pessoas não tem conhecimento das medidas de renovação disponíveis para melhorar o desempenho energético do edifício e os benefícios adicionais que essas medidas podem trazer (FERREIRA et al., 2016). Naturalmente, cada medida de eficiência, como adicionar isolamento, usar lâmpadas mais eficientes, incorrerá em um custo financeiro, mas a economia de eletricidade após renovações pode ser igual ou superior à do custo inicial após vários anos de operação. Utiliza-se, dessa forma, cálculos precisos de custos de cada medida iniciais e relativos de manutenção e seus benefícios financeiros finais globais, no método Custo de

Ciclo de Vida (CCV) simplificado, onde decide-se, se serão implementados ou não nas obras de retrofit para economia de energia (OUYANG et al., 2009).

Elevados investimentos iniciais e análise de custo-benefício em um espaço curto de tempo são identificados como problemas para o aumento do desempenho energético de edifícios. Nesse sentido, é crucial adotar uma abordagem do custo do ciclo de vida para a análise de custo-efetividade, uma vez que inclui o valor do investimento e a economia de energia alcançada. O uso do método do custo do ciclo de vida para a melhoria do custo do nível de desempenho energético, tanto em edifícios novos e reformados quanto em elementos de construção, com o objetivo de definir padrões e requisitos mínimos, é um tema muito explorado pelos pesquisadores (FERREIRA et al., 2016).

Ouyang et al. (2009) levaram em consideração os custos iniciais, de manutenção e a economia total de eletricidade. Nesse cenário, o custo de eletricidade e materiais depende de muitos fatores, como por exemplo o mercado e a inflação. Nessa perspectiva, utilizar a metodologia do ciclo de vida é uma forma de incluir esses fatores na avaliação econômica do desempenho energético (FERREIRA et al., 2016).

Para comparar e avaliar os diferentes pacotes de renovação possíveis, foi desenvolvido o custo do ciclo de vida dos vários cenários possíveis por Ferreira et al. (2016). O custo do ciclo de vida é um conjunto de métodos que calculam e avaliam sistematicamente o custo de uma obra ao longo de seu ciclo de vida completo ou durante um período definido de observação, equilibrando o investimento monetário inicial com a despesa de longo prazo, relacionadas a possuir e operar o edifício.

Existem inúmeras metodologias de cálculo do custo do ciclo de vida, sendo os mais relevantes o Valor Presente Líquido (VPL), Anuidade Equivalente (AE) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Na análise do VPL, todos os custos durante o período definido são relacionados ao seu valor presente no momento do investimento inicial, inserindo os custos que ocorrerão em uma data posterior, não como seu valor nominal, mas como a soma que teria a reservar no momento presente a fim de obter o montante efetivamente mais demorado por meio da aplicação de uma taxa de juro prefixada. Anuidade Equivalente é o custo por ano de possuir e operar um ativo ao longo de toda a sua vida útil e é vantajosa como uma ferramenta de tomada de decisão no orçamento de capital quando se compara projetos de investimento de períodos de vida desiguais. A Taxa interna de retorno é a taxa de desconto que faz com que o valor presente líquido estimado de um investimento seja igual a zero, e a regra da taxa interna de retorno é realizar um projeto quando sua taxa interna de retorno excede o

retorno exigido. Além disso, uma variedade de metodologias de análise econômica pode ser utilizada para avaliar a relação custo-benefício de investimentos em renovação de prédios, tais como Taxa Geral de Retorno, Relação Benefício-Custo, Período de Retorno Reembolsado e Período de Retorno Simples. Quando o fluxo de caixa futuro é levado em conta, o VPL é identificado como a técnica mais amplamente utilizada para a avaliação ótima do custo de energia do edifício, e vários projetos têm usado esse método (FERREIRA et al., 2016).

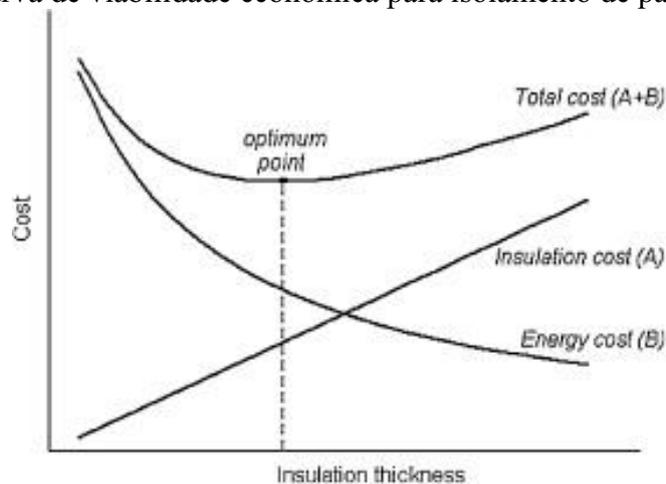
Segundo Niemelä et al. (2017), a principal lacuna da metodologia no custo do ciclo de vida é que se concentra principalmente nas medidas eficiência energética de forma isolada, em detrimento de outros métodos de cálculo. No entanto, esses estudos foram realizados utilizando o método de pesquisa mais convencional, onde diferentes medidas e a sua influência sobre o desempenho energético global dos edifícios estudados foram limitados a casos pré-definidos. Assim, a metodologia empregada se torna falha para estudos maiores e mais detalhados, pois o método de pesquisa convencional limita tanto o número total de medidas estudadas que podem ser selecionadas quanto a precisão e confiabilidade dos resultados, quando várias medidas e suas viabilidades econômicas são estudadas simultaneamente. O método de pesquisa convencional não pode garantir a solução global de otimização de custo de várias medidas simultâneas, porque pode facilmente haver milhares ou até milhões de diferentes combinações de solução, dependendo do caso. Diante disso, surgiram pesquisas como de Niemelä et al. (2017) e Diakaki et al. (2010), que propuseram o uso da otimização multiobjetiva. Cada um será melhor explorado posteriormente, porém eles defendem um tomador de decisões com infinitas opções. Para esta pesquisa, o método convencional é suficiente para as análises que serão realizadas.

Outro questionamento levantado por Krarti et al. (2017) e Ouyang et al. (2009) foram os baixos preços da energia. Segundo Krarti et al. (2017), que faz o estudo na Arábia Saudita, os baixos preços, por causa da grande disponibilidade de petróleo, acabam sendo uma barreira para o setor privado investir na melhoria de eficiência energética. No caso da China, Ouyang et al. (2009) destacam a importância desses baixos preços, pois o valor da energia é subsidiado pelo governo para as famílias pobres. Nesse caso, o fator social torna-se relevante no controle dos preços da energia.

2.1.2 Estudos de Caso de viabilidade financeira para melhoria de EE

Uma estratégia para melhorar o desempenho térmico da edificação é aprimorar a sua envoltória. Kaynakli (2012) faz uma revisão da análise de viabilidade financeira de isolamento utilizando o custo do ciclo de vida e VPL baseado no desempenho térmico pelo conceito graus x horas. O conceito de viabilidade econômica no uso de isolantes é demonstrado na Figura 3, onde o custo com o material isolante é acrescido ao custo da energia e o ponto ótimo é o menor ponto da curva dessa soma. Tal conceito também é usado por Sagbansua & Balo (2017). Os resultados obtidos pelo autor mostram que investir em isolamento para os climas estudados é viável.

Figura 3 - Curva de viabilidade econômica para isolamento de paredes



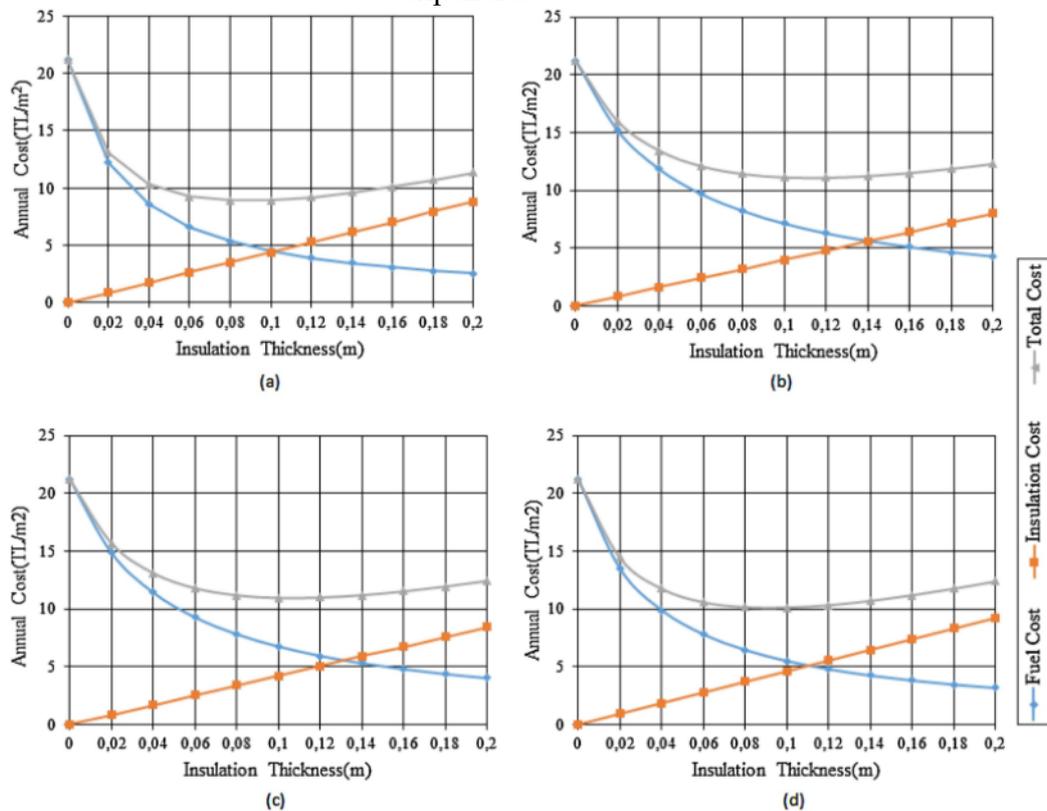
Fonte: Kaynakli (2012)

Sagbansua & Balo (2017), estudando o impacto ambiental e econômico de materiais alternativos para isolamento da envoltória na Turquia por meio do desempenho energético, trazem uma vertente mais ecológica, pois muitos isolantes são provenientes de materiais que emitem CO₂ e uma das questões da eficiência energética é a ambiental. Os materiais da pesquisa são chapa de fibra de madeira; laje de lã de madeira; perlite expandida e cortiça expandida, com condutividade térmica (W/m.K) de 0,035; 0,065; 0,06 e 0,045 respectivamente. Os materiais de isolamento eficiente são quatro vezes mais caros que os convencionais e foram analisados por meio do ciclo de vida também.

As conclusões obtidas ilustram que, à medida que aumenta o isolamento térmico, as emissões e o consumo energético reduzem; porém, o investimento inicial aumenta linearmente com as alterações do isolamento. No entanto, os investimentos globais não

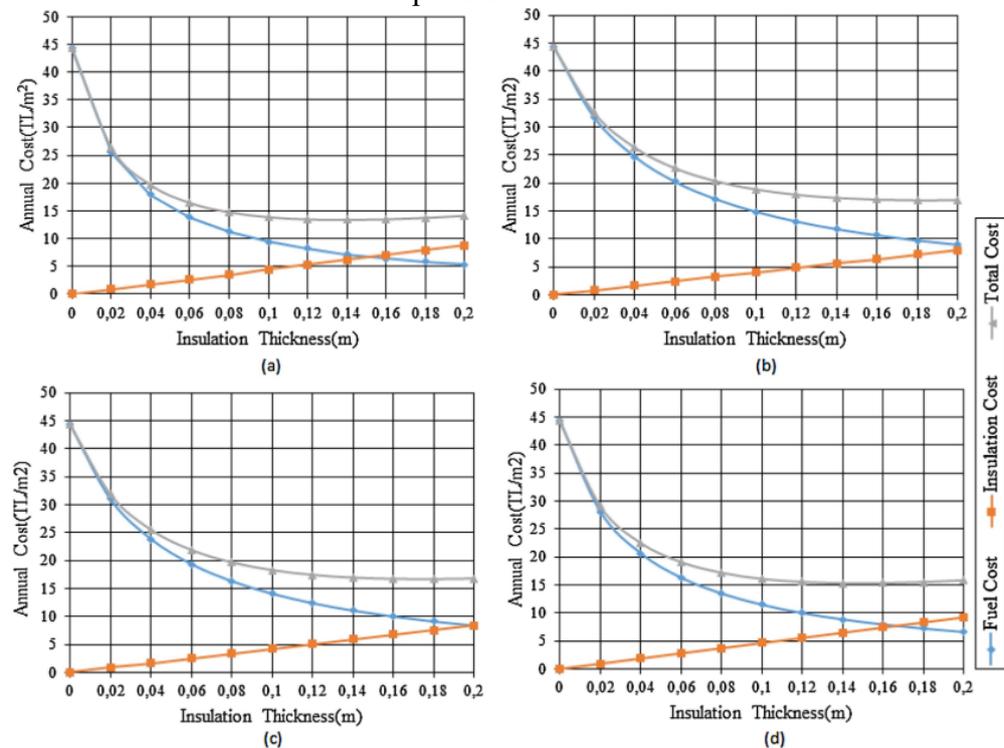
sofrem influência dessas alterações, ou seja, os investimentos reduzem com o aumento da espessura do isolamento térmico. As Figuras 4 e 5 mostram o impacto da espessura do isolamento na despesa total ao longo de dez anos de vida (considerado pelos autores o ciclo de vida das paredes) de uma parede de sanduíche para o aquecimento de cargas nas províncias de Malatya e Ardahan, respectivamente (tomando os valores da geração de energia por combustíveis fósseis). Os graus horas de aquecimento são 2461 e 5137 para Malatya e Ardahan, respectivamente. Devido às diferenças das zonas climáticas entre as cidades, a espessura ideal do isolamento varia significativamente de uma zona para outra.

Figura 4 - Efeito da espessura do isolamento no custo para a província de Malatya (Turquia).
a - chapa de fibra de madeira; b - laje de lã de madeira; c - perlite expandida; d - cortiça expandida.



Fonte: Sagbansua & Balo (2017)

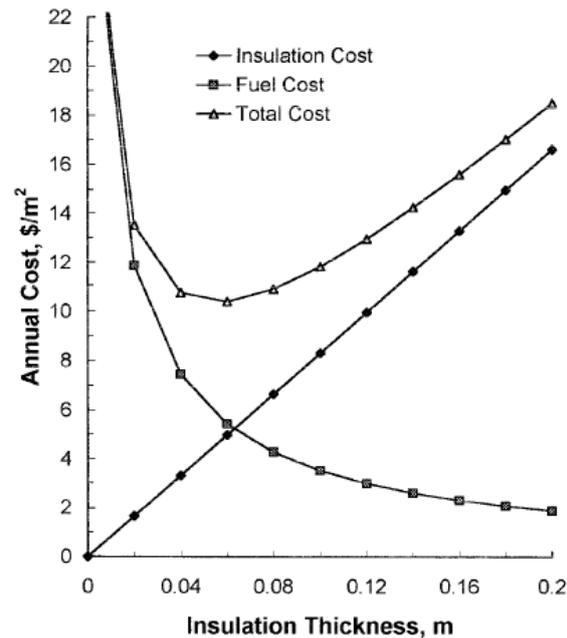
Figura 5 - Efeito da espessura do isolamento no custo para a província de Ardahan (Turquia)
 a - chapa de fibra de madeira; b - laje de lã de madeira; c - perlite expandida; d - cortiça expandida.



Fonte: Sagbansua & Balo (2017)

Na Palestina, Hasan (1999) desenvolveu uma abordagem sistemática para a otimização da espessura do material de isolamento baseada na análise de custo do ciclo de vida. As economias na pesquisa chegaram até 21 US\$/m² e os períodos de retorno ficaram entre de 1 a 1,7 anos para lã de rocha, e entre 1,3 e 2,3 anos para o isolamento de poliestireno, dependendo do tipo de estrutura da parede. À medida que a espessura do isolamento aumenta, a carga de aquecimento diminui, baixando, também, o custo de combustível e custo total de aquecimento. Por outro lado, o custo de isolamento aumenta à medida que aumenta a espessura. O custo total do combustível e material de isolamento mostra o ponto de menor valor quando plotada versus a espessura do isolamento, como mostrado na Figura 6 para a parede com isolamento de lã de rocha. Mesmo sendo um estudo antigo, é uma pesquisa que mostra o uso de isolamento para climas mais quentes (se comparado aos europeus) e demonstra a possibilidade do uso de isolantes nesse cenário.

Figura 6 - Custo de aquecimento para edifícios isolados versus espessura de isolamento.

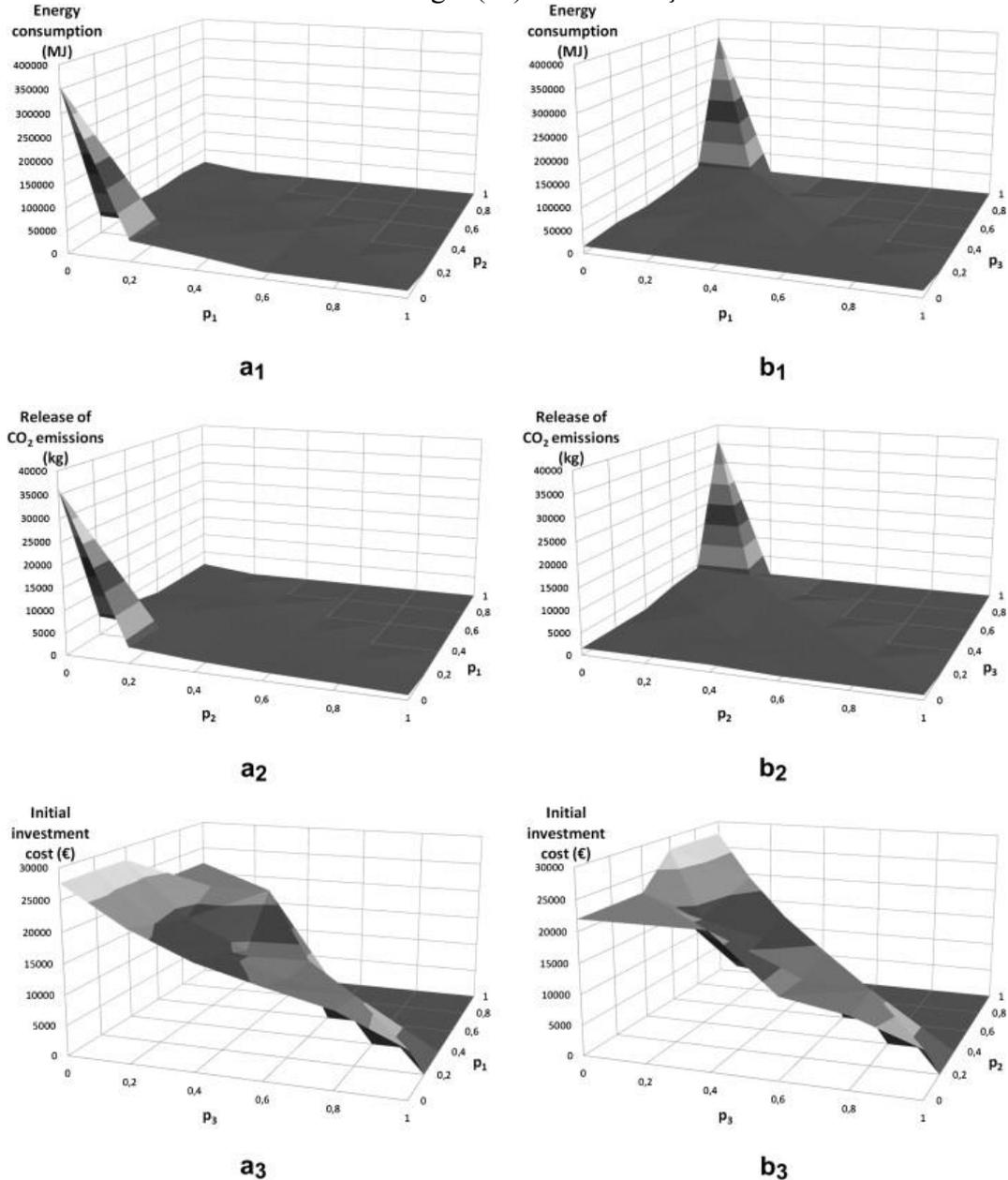


Fonte: Hasan (1999)

Diakaki et al. (2010) analisam medidas de eficiência energética alternativas de acordo com critérios como consumo de energia, emissões de CO₂ e custo do investimento inicial na Grécia. Os autores defendem que esse conceito de otimização deve ser aplicado na fase de projeto e dão suporte para opções. A pesquisa conta com uma solução matricial e, embora o foco seja reduzir o consumo da maneira mais econômica possível, pode-se otimizar os três critérios: CO₂, consumo de energia e custos. Os três critérios são otimizados independentemente e estão representados por p₁, p₂ e p₃, respectivamente (Figura 7), como coeficientes de peso correspondentes, refletindo a importância relativa dos três critérios. A solução do problema resultante para diferentes valores dos coeficientes de peso leva a várias soluções diferentes. À medida que o coeficiente de peso de qualquer critério aumenta de 0 para 1, seus valores correspondentes diminuem e finalmente alcançam seu valor ótimo quando apenas este critério é otimizado, independentemente dos demais. Para valores intermediários dos coeficientes de peso, várias soluções podem ser obtidas que favorecem cada critério em um nível mais alto ou mais baixo, dependendo dos valores específicos que foram selecionados. Esse comportamento é demonstrado pela Figura 7, que apresenta graficamente as mudanças dos valores dos critérios em relação aos valores do coeficiente de ponderação, indicando que quanto mais um critério é considerado importante pelo projetista, mais a decisão final é a favor desse critério. A pesquisa a ser realizada considera apenas dois

critérios, o consumo e o custo, mas Diakaki et al. (2010) demonstram como os critérios podem ser aplicados de forma conjunta e a influência que um tem sobre o outro.

Figura 7 - Consumo de energia vs emissões de CO₂ (a1) e custo de investimento inicial (b1); emissões de CO₂ vs consumo de energia (a2) e custo de investimento inicial (b2); custo de investimento inicial vs consumo de energia (a3) e de liberação de emissões de CO₂



Fonte: Diakaki et al. (2010)

Niemelä et al. (2017) apresentam medidas de reforma para desempenho energético em apartamentos na Finlândia. Foram rodadas 2 bilhões de combinações para minimizar o consumo de energia, além de terem sido feitos os cálculos do VPL e do custo do ciclo de vida.

Nessa pesquisa, os autores ressaltam também a importância do uso da energia em sua forma primária na fase de uso no ciclo de vida do edifício, pois em lugares mais quentes, ela pode representar até 85% da energia consumida ao longo do ciclo de vida.

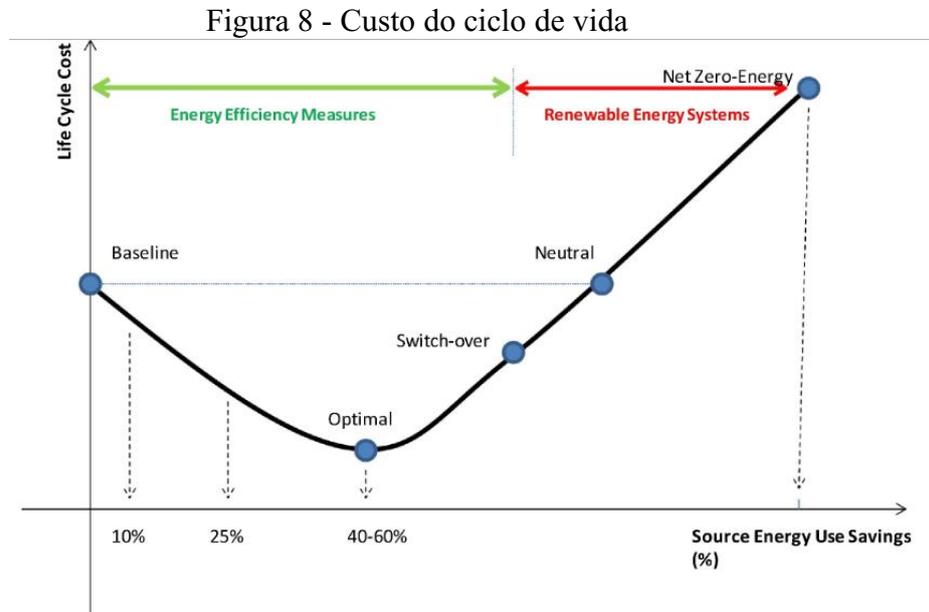
Ouyang et al. (2009) analisaram os benefícios econômicos das medidas de eficiência pelo método do custo do ciclo de vida com base em simulação e medições locais na China. O cenário avaliado deu sempre negativo para todas as opções. O autor percebeu que os preços das medidas de eficiência são muito elevados e o preço da energia muito barato, por ser subsidiado pelo governo, como já comentado anteriormente. No entanto, os autores levantam a importante questão da comparação da medição *in loco* com a simulação computacional, pois nem sempre a simulação consegue suprir todas as variáveis da realidade.

Ferreira et al. (2016) analisam diretrizes de rentabilidade por meio do investimento em envoltórias e atrela as estratégias ao Net Zero Energy Building (NZEB), ou seja, instalando os painéis FV após o uso de medidas de EE; integrando custos, desempenho energético e energia renovável, para o clima de Portugal. Os autores declaram que o conceito-chave para a renovação econômica é flexibilidade. Usando a abordagem CCV, vários cenários diferentes foram analisados para atender às necessidades propostas. Os aperfeiçoamentos recomendados, que envolvem melhoria de isolamento na envoltória (parede, telhado e janelas), chegaram a uma economia de 88% em edifícios unifamiliares e 43% em edifícios multifamiliares, sendo a solução do isolamento a proposta pelos autores.

Krarti et al. (2017) avaliam os impactos ambientais e econômicos dos programas de eficiência energética da Arábia Saudita. No país, por questões culturais, é mais fácil realizar auditorias e reformas de energia em edifícios não residenciais maiores do que em edifícios residenciais menores. Caso essa barreira não existisse, as habitações poderiam ter um nível de eficiência maior. Além disso, a modernização de edifícios residenciais oferece desafios específicos de privacidade e sensibilidade cultural em vários países da região árabe, sendo assim, é mais difícil as auditorias serem realizadas para atestar o cumprimento da norma de eficiência.

Segundo os autores, dentre as medidas de eficiência, a que apresenta maior impacto no consumo é o ar condicionado eficiente, e a segunda, a adição de isolamento. Esse artigo demonstrou que, com a adoção de tecnologias de eficiência energética e energias renováveis, os edifícios podem ter baixo consumo de energia e até energia zero. Edifícios residenciais na Arábia podem ser projetados para consumir menos de 60% dos níveis de consumo atuais. O

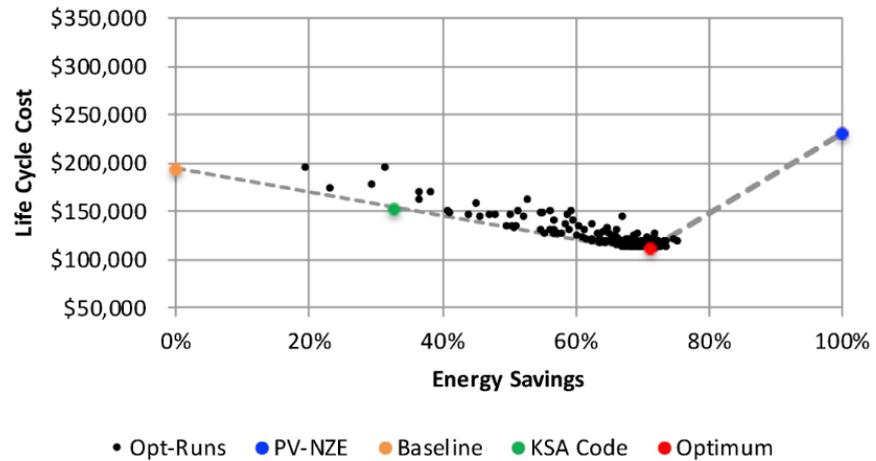
método utilizado para otimização do custo está demonstrado no gráfico da Figura 8, e a Figura 9 apresenta as etapas do processo.



Fonte: Krarti et al. (2017)

Figura 9 - Caso ótimo residencial para a cidade de Riyadh

KSA - Riyadh

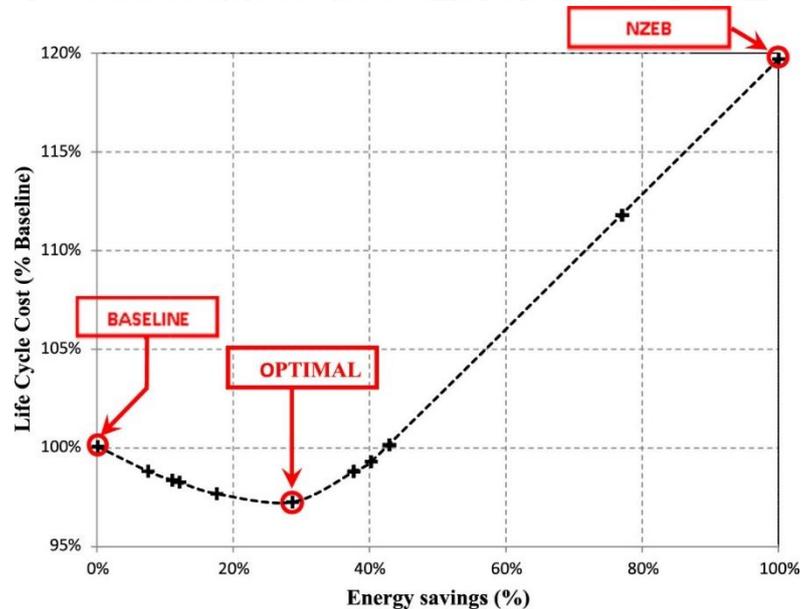


Fonte: Krarti et al. (2017)

Em Bahrein, Krarti e Dubey (2018) estudaram o potencial da aplicação de medidas e tecnologias comprovadas para melhorar a eficiência energética do setor de construção. Os resultados da análise de otimização usando a técnica de busca sequencial são ilustrados na

Figura 10, que mostra o custo normalizado do ciclo de vida (expresso como a porcentagem do custo do ciclo de vida base) em função da porcentagem na economia de energia anual.

Figura 10 - Custo do ciclo de vida de uma residência em Bahrein



Fonte: Krarti e Dubey (2018)

A análise detalhada dessa pesquisa indica que investir em eficiência energética no estoque de edifícios residenciais no Bahrein apresenta benefícios, como a redução no consumo de eletricidade, do pico de demanda elétrica, emissões de carbono, bem como a criação de um número considerável de oportunidades de emprego. No geral, a implementação de programas de eficiência energética para edifícios novos e existentes tem o potencial de reduzir em 62% o consumo anual de combustível necessário para a geração de eletricidade de Bahrein (KRARTI & DUBEY, 2018).

Um edifício de energia zero, de forma simplificada, é o edifício no qual, após as aplicações de medidas de eficiência, são aplicadas fontes de energia renovável para que dentro de um tempo determinado o balanço de energia consumida e gerada seja nulo. Dentro dessa premissa, Pacheco e Lamberts (2013) estudaram as viabilidades técnicas desse modelo para o Brasil. Uma das conclusões realizada pelos autores foi que o uso de isolamento nas envoltórias não é o modelo mais eficiente energeticamente na maioria dos países quentes. Mesmo sendo uma país com dimensões continentais, a maior parte do Brasil tem um clima com temperaturas mais elevadas.

2.1.3 Realidade das pesquisas brasileiras

A falta de acesso à moradia por parte considerável da população, principalmente de famílias de baixa renda, é atualmente um problema sério no Brasil. Em 2015, o déficit habitacional estimado correspondia a 6,355 milhões de domicílios, dos quais 5,572 milhões, ou 87,7%, estão localizados nas áreas urbanas e 82,5% afeta famílias com renda até no máximo três salários mínimos (PINHEIRO, 2018). Em 2009, o governo brasileiro lançou o Programa Minha Casa, Minha Vida, como estratégia para enfrentar o déficit (BRASIL, 2009). No país, até o ano de 2017 já foram investidos R\$ 337,3 bilhões para a contratação de 4,5 milhões de unidades e mais de 3,3 milhões de moradias foram entregues (BRASIL, 2017). Nesse cenário, um número máximo de unidades habitacionais deve ser construído com uma quantidade limitada de investimento. Dessa forma, com a necessidade de acelerar o processo de construção e reduzir custos, o projeto de habitação social foi pensado em um modelo padronizado em todo o país, sem a preocupação de especificações das condições climáticas. Assim, o custo de investimento por unidade habitacional torna-se relativamente baixo, contribuindo em má qualidade de construção, o que dificulta a inclusão de medidas de eficiência energética, não atendendo às necessidades dos usuários de várias maneiras, incluindo conforto térmico e desempenho energético (BODACH & HAMHABER, 2010; DALBEM et al., 2019).

O grupo-alvo de habitação social, os estratos mais pobres da população, sofrem com os crescentes custos energéticos, pagando uma parte alta de sua renda para serviços de energia. A maioria dos usuários de habitação social tem baixo poder aquisitivo e, muitas vezes, não possuem recursos financeiros para arcar com as despesas dos sistemas ativos para superar o desconforto térmico. Há uma necessidade de pesquisa no campo da eficiência energética em habitações sociais para melhorar a sustentabilidade da vida das pessoas, visando os custos (BODACH & HAMHABER, 2010; DALBEM et al., 2019).

Triana et al. (2015) demonstraram um desempenho térmico e energético médio e baixo para projetos representativos do setor de baixa renda em relação à Rotulagem Energética Brasileira, mostrando a importância da implementação de medidas para melhorar o desempenho termoenergético. Os autores identificaram medidas para realizar essas melhorias, que podem ser divididas em dois grupos. O primeiro refere-se às medidas que podem ser realizadas sem intervenções na concepção do projeto; o segundo, implica em maiores mudanças nos projetos. O primeiro grupo inclui janelas adequadas que satisfazem as necessidades de ventilação natural e os pré-requisitos de luz natural da etiquetagem

energética, a absorção de cores das paredes e, em alguns casos, dos telhados. O segundo grupo inclui mudanças no design do projeto, que permitem a ventilação cruzada nas unidades, reduz as transmitâncias térmicas dos telhados, reduz as transmitâncias para paredes para maiores absorções solares, inclui o sombreamento de janelas (persianas externas) ou a implementação de aquecimento solar de água, entre outros. O último também pode incluir a geração de energia na casa através da integração de painéis fotovoltaicos, que poderiam ser incentivados a partir do setor de energia. Percebe-se nos resultados da pesquisa que a maioria dessas decisões são tomadas pelos engenheiros e arquitetos e poderiam ser aplicadas sem grande aumento no orçamento da edificação.

Bodach e Hamhaber (2010) realizaram entrevistas com profissionais e acadêmicos da área da construção civil. Eles perceberam que, além da conscientização, a educação e a capacitação também desempenham um papel importante para aumentar a eficiência energética. Os profissionais do setor da construção, como arquitetos, têm pouco conhecimento sobre estratégias de adaptação climática e eficiência energética. Em geral, o conhecimento sobre eficiência energética entre os arquitetos ainda é muito baixo.

Segundo Cartana (2006), as dificuldades para que ocorra uma efetiva adaptação das premissas da arquitetura bioclimática para a edificação estão em parte na formação acadêmica e em parte nas problemáticas encontradas no mercado da construção civil. O Zoneamento Bioclimático do Brasil e suas estratégias recomendadas são, em sua maioria, desconhecidos pelos profissionais, e mesmo quando estudados na universidade, esses princípios não são regularmente aplicados no projeto na prática posterior (BODACH & HAMHABER, 2010).

O engajamento de profissionais, especialmente projetistas, que possuem conhecimento adequado sobre estratégias bioclimáticas e medidas de eficiência energética desempenha um papel fundamental na melhoria da eficiência energética da habitação social (BODACH & HAMHABER, 2010). Segundo Lian Wong e Krüger (2017), estudos mostram que a certificação energética também pode afetar positivamente o processo de tomada de decisões dos profissionais envolvidos na construção de projetos, dependendo da capacidade financeira do desenvolvedor e da capacidade dos proprietários de conceituar a economia dos custos no ciclo de vida.

Bodach e Hamhaber (2010) pesquisaram e desenvolveram medidas de eficiência energética, bem como as estratégias bioclimáticas de projeto, com a finalidade de melhorar, principalmente, o conforto térmico dos usuários e reduzir o consumo energético de um projeto de habitação social. Os resultados obtidos apresentam potencial de aumento de eficiência

energética em habitações de interesse social, sendo que cerca de 10% do valor do investimento inicial seria suficiente para incluir as medidas de eficiência energética.

Dalbem et al. (2019) discutiram a adaptabilidade da envoltória em um projeto de habitação de interesse social em diferentes climas na região sul do Brasil, no tipo Passivhaus (casas com alto desempenho térmico alcançado por meio de isolamento). O estudo foi desenvolvido em quatro etapas, e desenvolveu-se um modelo numérico, que foi executado utilizando o software EnergyPlus. Na primeira etapa, o desempenho térmico e energético do modelo base de referência foi avaliado. Na segunda etapa, foi realizada uma análise de sensibilidade, variando os parâmetros do envelope térmico do estudo de caso de construção, a fim de atender ao desempenho mínimo do nível de classificação “A”, de acordo com o Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética (RTQ-R) (INMETRO, 2012). Em um terceiro passo, o envelope externo do edifício foi otimizado por meio de um algoritmo evolutivo multiobjetivo. Em um último passo, o modelo numérico definido de acordo com o padrão Passivhaus foi otimizado, a fim de obter soluções ótimas.

Nesse contexto, os autores analisaram o desempenho térmico e energético e a viabilidade econômica das soluções. Os casos que atendem o RTQ-R apresentaram investimento adicional da casa referência entre 26% e 27%, enquanto os casos que atendem ao padrão Passivhaus apresentaram custos adicionais de 39% e 42% para as três zonas bioclimáticas. O período de retorno variou de 27 a 170 anos, considerando a vida útil de 50 anos da edificação. Os autores consideraram que dos 12 casos estudados, seis obtiveram viabilidade financeira. Mesmo esses casos estando dentro dos padrões de viabilidade estipulados pelos autores, é válido ressaltar que é um tempo alto e não muito atrativo para investidores; além disso, o uso de isolantes, que é a principal estratégia da Passivhaus, não é indicado para a maioria das zonas bioclimáticas brasileiras, principalmente as mais quentes.

As estratégias voltadas para a eficiência energética têm o intuito de economizar energia, principalmente as que são geradas de fontes não renováveis, em muitos casos baseadas na combustão de combustíveis fósseis (LIANG WONG & KRÜGER, 2017). No Brasil, que tem grande parte de seu suprimento primário de energia proveniente de usinas hidrelétricas, a fonte de eletricidade é a complementada por uma fonte baseada em combustível fóssil. O país vem apresentando uma tendência lenta, mas gradual, de não renováveis: entre 2005 e 2014 houve um aumento de pouco mais de 5% no fornecimento interno de fontes de energia não renováveis, e esta é a principal responsável pelo aumento do preço da eletricidade.

Em relação à geração de eletricidade, a queda percentual relativa da hidráulica em termos de sua participação no total de geração, nos anos de 2011 a 2015, foi de cerca de 20% (EPE, 2015). A matriz energética brasileira tem que ser cada vez mais complementada pela geração térmica para enfrentar o rápido crescimento da demanda. Quanto maior a parcela de eletricidade térmica, mais caro é o custo de produção e o impacto ambiental devido aos combustíveis fósseis. Para combater isso, novas fontes de energia renováveis, como eólicas, estão sendo construídas, além de usinas fotovoltaicas (ZURN et al., 2017). Outra forma de produzir energia renovável é de forma descentralizada com painéis FV integrados às edificações.

2.2 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ÀS EDIFICAÇÕES

Convencionalmente, as usinas de energia têm sido unidades grandes e centralizadas, isso gera longas linhas de transmissão, uma dependência alta de um só lugar e é necessário um valor alto de investimento inicial. Uma nova tendência está se desenvolvendo em direção à geração de energia distribuída, o que significa que as unidades de conversão de energia estão situadas próximas aos consumidores de energia, e as grandes usinas são substituídas pelas menores. Um sistema de energia distribuída é uma alternativa eficiente, confiável e ambientalmente amigável ao sistema de energia tradicional (ALANNE & SAARI, 2006). As políticas ambientais são provavelmente a principal força motriz da demanda por geração distribuída na Europa. As regulamentações ambientais forçam os participantes do mercado da eletricidade a buscar soluções mais limpas em termos de energia e custo (PEPERMANS et al., 2005). A energia renovável tem muitas vantagens ambientais e de segurança em comparação com fontes de energia convencionais, podendo enfrentar a mudança climática, diminuir a dependência da importação de combustível e diversificar as fontes de energia (CHOI et al., 2018).

Os benefícios da geração distribuída incluem: reduzir perdas na distribuição, diminuir a carga da rede, diversificar a matriz energética do país e atrasar investimentos em aumento de capacidade de subestações e linhas de transmissão (DIAS et al., 2017; VILAÇA GOMES et al., 2018). Dificilmente podemos imaginar uma situação em que o consumo total de eletricidade de um país seja coberto por uma única usina. Por outro lado, o retorno à completa autossuficiência (como no século passado com a lenha) em termos de energia parece improvável. O sistema de energia dificilmente será completamente centralizado ou

completamente descentralizado. É provável que se esteja criando um sistema onde os subsistemas centralizados e descentralizados operem em paralelo uns aos outros (ALANNE & SAARI, 2006).

O marco para a geração distribuída no Brasil foi a Resolução Normativa nº 482, aprovada em abril de 2012, que formalizou as regras para a compensação de sistemas de geração distribuída. Os clientes podem instalar painéis solares fotovoltaicos, além de outras fontes, e injetar energia excedente no sistema. Os créditos gerados podem ser usados para compensar as contas de energia elétrica através do sistema de compensação de energia da ANEEL. A Resolução, então, estabeleceu regulamentos mínimos para impulsionar um mercado de geração distribuída. O custo de produção de energia solar também começou a diminuir em escala global, mitigando dúvidas que ainda permaneciam sobre o potencial realista das tecnologias solares (BRADSHAW, 2017).

Nesse contexto, a exploração de energias renováveis descentralizadas no Brasil possui um grande potencial de energia solar devido à localização geográfica, com radiação solar global horizontal à média anual que varia entre 3500 e 6250 Wh/m².dia (PEREIRA et al., 2017). No entanto, a capacidade instalada de produção de energia fotovoltaica no país é extremamente baixa em comparação com outros países, especialmente os europeus (DIAS et al., 2017; VILAÇA GOMES et al., 2018). A conversão direta da luz do sol em eletricidade com geradores fotovoltaicos ligados à rede gera vários benefícios para o meio ambiente e para o sistema elétrico. A principal vantagem técnica é a possibilidade de produzir energia elétrica limpa e renovável perto dos consumidores, integrando geradores fotovoltaicos em edifícios ou em áreas urbanas (RÜTHER & ZILLES, 2011).

Os painéis fotovoltaicos podem ser integrados na envoltória das edificações para a geração de energia elétrica, eliminando, assim, o uso adicional da terra. Em geral, a combinação de tarifas residenciais elevadas com a alta disponibilidade de radiação solar sugere que a eletricidade fotovoltaica pode alcançar a viabilidade econômica para instalações de telhado conectadas à rede (AKOREDE et al., 2010; DÁVI et al., 2016). Segundo Aquila et al. (2017), a principal barreira para a penetração das fontes renováveis de energia em sistemas de energia elétrica são os altos custos tecnológicos, o que pode colocar essa alternativa em desvantagem em relação ao custo-benefício, se comparada com fontes convencionais.

O custo total do sistema fotovoltaico consiste no custo dos módulos, da instalação, do inversor, do medidor bidirecional, dos cabos, de proteção e manutenção (VILAÇA GOMES et al., 2018). Segundo Mitscher e Rütther (2012), as condições de viabilidade

econômica permitiriam que os proprietários de casas particulares instalassem sistemas fotovoltaicos de pequena escala em seus telhados e produzissem eletricidade que poderiam consumir ou vender à concessionária sem custo adicional. Para avaliar a economia de tal investimento, é necessário definir o custo da eletricidade gerada por energia fotovoltaica e o desempenho financeiro geral do projeto, considerando os fluxos de caixa de despesas e receitas. Essas avaliações foram realizadas nos casos a seguir, tomando como base o Brasil, de forma cronológica e mostrando a evolução, sendo a viabilidade alcançada em todas as cidades brasileiras atualmente.

2.2.1 Estudos de Caso no Brasil

Mitscher e Rüter (2012) avaliaram a performance econômica para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A pesquisa avaliou cinco cidades brasileiras: Brasília, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo e Florianópolis. Para avaliar a economia do investimento em sistemas FV, é necessário definir o custo da eletricidade gerada por energia fotovoltaica e o desempenho financeiro geral do projeto, considerando os fluxos de caixa de despesas e receitas. Assim, os autores analisaram esses indicadores utilizando o custo nivelado de eletricidade e o valor presente líquido, que dá uma impressão da economia atual e potencial futuro de sistemas fotovoltaicos em pequenos telhados no contexto brasileiro. Os preços nivelados do custo da eletricidade podem ser competitivos economicamente com as tarifas residenciais. Mostrou-se, ainda, que o custo de capital no caso do Brasil é o parâmetro decisivo na determinação da competitividade do sistema FV com fontes de geração convencionais. Por esse motivo, a prestação de serviços financeiros que possibilitam financiamento a longo prazo e de baixo custo é um requisito essencial para que a energia fotovoltaica se torne uma alternativa de geração economicamente justificável no cenário da pesquisa.

Montenegro (2013) desenvolveu uma metodologia para análise do retorno do investimento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e integrados à edificação. O autor considerou o fluxo de caixa mensal para os cálculos de VPL, TIR e tempo de retorno. O autor concluiu que, de acordo com os cenários considerados, o retorno do investimento era excessivamente longo para todas as 27 capitais do Brasil. No entanto, se não fosse cobrado imposto sobre a energia injetada na rede elétrica, o investimento seria viável em 12 capitais.

Holdermann et al. (2014) utilizaram o método de fluxo de caixa descontado para calcular os custos de investimentos específicos que são necessários para saber se os sistemas

fotovoltaicos são economicamente viáveis para cada uma das 63 redes de distribuição no Brasil. No cálculo, foram utilizadas as tarifas de energia elétrica, incluindo taxas e impostos, obtidas por meio de entrevistas por telefone e informações disponíveis ao público. No cenário estudado, em nenhuma das redes de distribuição a energia fotovoltaica era economicamente viável nos setores comercial ou residencial.

Lacchini e Rüther (2015) calcularam a viabilidade financeira para cinco cidades brasileiras: Brasília, Belo Horizonte, Fortaleza, Manaus e Porto Alegre. No cálculo, foi usado fluxo de caixa, custo da energia elétrica nivelado e tempo de retorno. Os tempos de retorno variam de aproximadamente 9 a quase 16 anos, considerando a vida útil de 25 anos, são resultados viáveis. Dentre as cidades estudadas, Fortaleza apresentou o melhor resultado, enquanto Brasília, o pior.

Dávi et al (2016) avaliaram o cenário de casa de energia zero em quatro cidades brasileiras: Brasília, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. Os resultados mostraram que o sistema de compensação no Brasil pode ser lucrativo. O tempo de retorno mostrou-se menor em Brasília e Belo Horizonte devido a maiores tarifas de energia elétrica. O estudo demonstrou, dessa forma, que os cenários econômicos variam de acordo com cada local, dependendo das tarifas de eletricidade e taxas de desconto aplicáveis. A viabilidade do investimento mostrou-se promissora, mas, segundo os autores, devem ser mantidos incentivos financeiros em paralelo com a redução anual de preços da tecnologia FV.

Vale et al. (2017) fizeram uma análise econômica dos sistemas fotovoltaicos integrados a casas do programa Minha Casa, Minha Vida no estado do Piauí e de São Paulo. A metodologia aplicada foi o fluxo de caixa para o cálculo do valor presente líquido e a taxa interna de retorno, comparando a influência da isenção do ICMS. Em todos os cenários dos casos estudados, a taxa interna de retorno foi maior que a taxa mínima de atratividade, o que comprova a viabilidade econômica para a implantação do sistema, além de ser uma oportunidade de combinar esse programa social com a possibilidade de diversificar a matriz energética utilizando o potencial solar do país.

Montenegro et al. (2019) atualizaram o estudo de Montenegro (2013) e, no cenário analisado, todas as capitais apresentaram um excelente investimento para o consumidor residencial. O tempo de retorno do investimento variou de 3,5 a 6,8 anos e a Taxa Interna de Retorno, de 21,5% a 40%. Os autores comprovaram a viabilidade dessas instalações no Brasil para o contexto residencial.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão demonstrou um aumento na demanda de energia, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. O aumento do poder aquisitivo faz com que o uso de ar condicionado seja cada vez maior e, conseqüentemente, gere o aumento da demanda de energia. Conforme observado, esse consumo pode ser reduzido com medidas passivas e ativas de medidas de EE em edificações. No âmbito internacional, as pesquisas focaram em acrescentar isolamento na envoltória e melhorar os equipamentos. No cenário brasileiro, o destaque é nas intervenções de projeto, medidas passivas para melhorar o desempenho termoenergético das edificações. Os estudos descritos na revisão focalizam na relação da implementação de medidas de EE e os custos, utilizando principalmente o custo do ciclo de vida para os cálculos de viabilidade financeira, metodologia que foi adotada para a presente pesquisa.

O uso de energia renovável de forma descentralizada foi defendido de acordo com os benefícios explicitados pelos autores na revisão. Os estudos demonstraram a viabilidade econômica do uso de FV no Brasil. No entanto, percebeu-se uma lacuna nos artigos e pesquisas a respeito da comparação do uso de medidas de EE e sistemas FV pelo viés econômico. Dessa forma, busca-se, com base nas pesquisas já realizadas, trabalhar as duas vertentes, para entender a relação do custo-benefício entre o desempenho termoenergético e geração de energia.

A partir das informações abordadas na fundamentação teórica, juntamente com a identificação de lacunas de conhecimento, como foi discutido até agora, o próximo capítulo formula a metodologia utilizada nesta pesquisa.

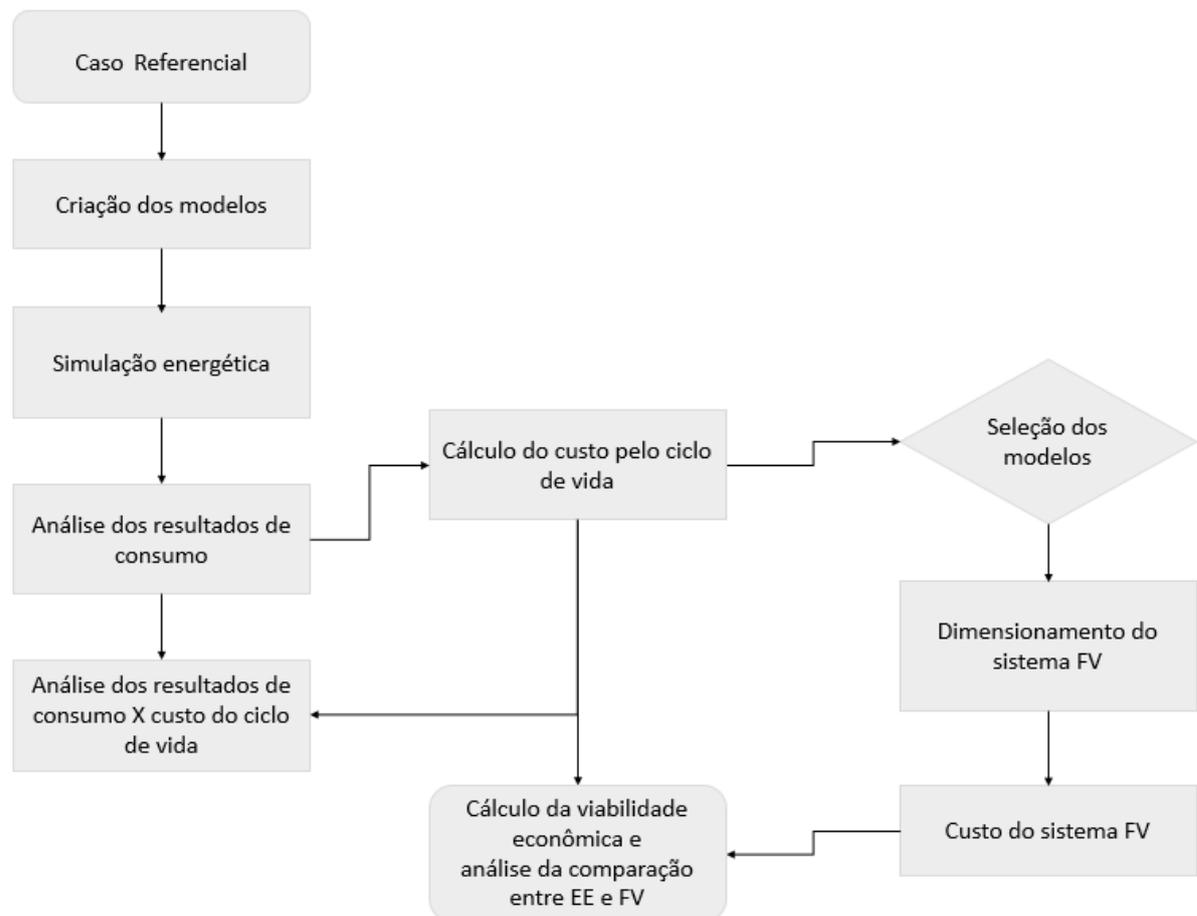
3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para o desenvolvimento da pesquisa atendendo ao objetivo proposto. Para tal, o procedimento metodológico foi subdividido em sete grandes atividades:

- Definição e caracterização do edifício referencial;
- Criação dos modelos para a aplicação de estratégias de EE;
- Simulação computacional das edificações;
- Caracterização dos custos da edificação e do ciclo de vida;
- Seleção dos modelos (melhor custo-benefício e modelo com maior economia de energia) para o dimensionamento dos sistemas de FV;
- Apropriação do custo do sistema FV;
- Cálculo da viabilidade econômica e comparação entre os sistemas EE e FV.

O diagrama do desenvolvimento da pesquisa está na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama da metodologia



Fonte: Autoria Própria (2020)

Tabela 1 - Relação dos objetivos e atividades a seres executadas

	Objetivos	Atividades
Específicos	Levantar o potencial de economia de energia que pode ser atingido por meio da implementação de medidas projetuais de mitigação para consumo de energia em uma residência de baixo padrão no Brasil	Determinar o edifício referencial, simular e determinar o consumo
		Aplicar as estratégias de EE no edifício, simular e determinar o consumo
	Avaliar o custo das medidas de eficiência energética e a relação com o custo do consumo evitado por elas, de forma isolada	Calcular os custos do ciclo de vida do edifício referencial
		Calcular os custos do ciclo de vida do edifício eficiente, sendo considerada cada estratégia
	Avaliar os diferentes cenários de demanda de energia para o dimensionamento dos sistemas FV	Dimensionar os painéis FV do edifício referencial
		Dimensionar os painéis FV do edifício eficiente
Analisar a viabilidade financeira do sistema FV para os diferentes cenários de consumo		
Avaliar os custos do ciclo de vida das medidas de eficiência energética aplicadas em conjunto e dos sistemas fotovoltaicos	Calcular os custos do ciclo de vida do edifício eficiente com as medidas aplicadas em conjunto com o sistema FV	
Geral	Comparar a minimização do consumo de energia e a geração de energia fotovoltaica distribuída em habitações de interesse social unifamiliares, pelo viés da relação custo x benefício.	Comparar economicamente de forma isolada EE e FV.

Fonte: Autoria Própria (2020)

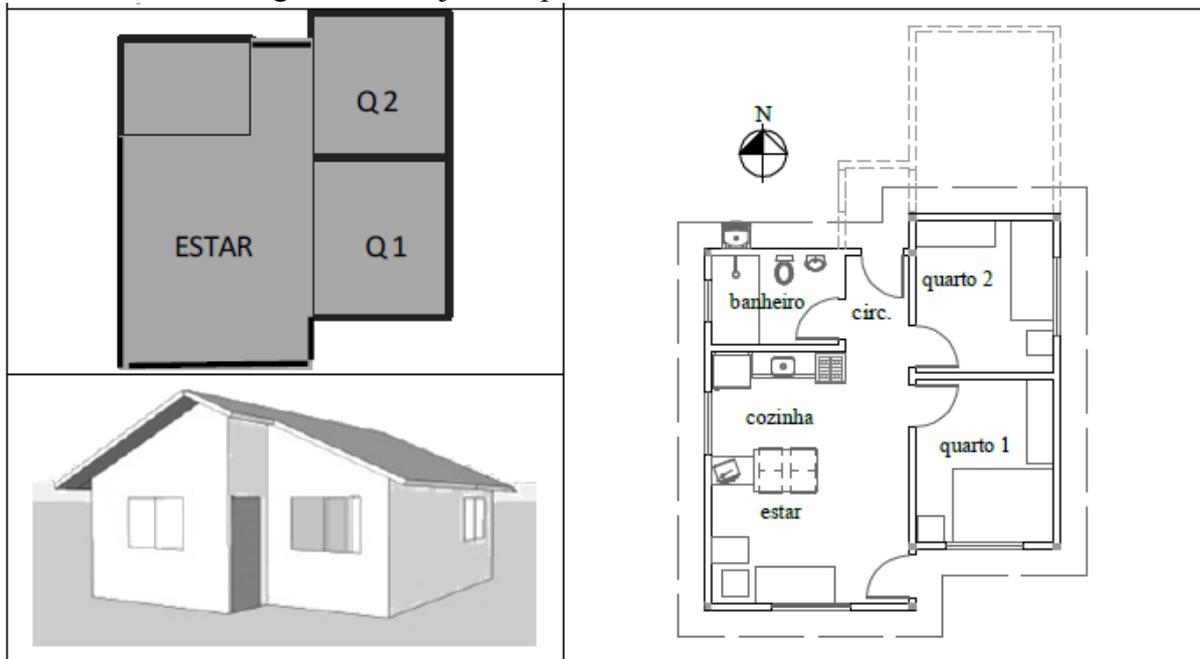
Nos próximos tópicos serão descritas as atividades apresentadas na tabela acima, caracterizando como as mesmas foram desenvolvidas. Por fim, serão apresentadas as análises dos resultados.

3.1 DETERMINAÇÃO DO EDIFÍCIO REFERENCIAL

É importante a definição de um edifício de referência no qual as medidas de eficiência possam ser aplicadas e os sistemas FV sejam dimensionados de acordo com esse consumo. A pesquisa foi aplicada para a cidade de Florianópolis (SC) que conta com clima subtropical classificado como mesotérmico úmido. A planta baixa e volumetria adotada é apresentada na Figura 12. Tendo como foco de interesse as habitações unifamiliares, utilizou-se um projeto representativo para as habitações unifamiliares térreas com o layout de maior frequência de ocorrência aplicado e determinado por Triana (2016). Esse layout foi

determinado através de medidas medias de 47 projetos que representam mais de 50 mil unidades calculadas para cobrir as regiões brasileiras.

Figura 12 - Projeto Arquitetônico do edifício referencial



Fonte: Triana (2016)

As características principais do projeto para a casa unifamiliar térrea estão descritas a seguir:

- Ventilação cruzada;
- Beiral: 50 cm;
- Pé-direito: 2,50 m;
- Chuveiro elétrico para aquecimento de água, considerando potência do equipamento $> 4.600\text{W}$;
- Piso: piso cerâmico 0,75 cm + 2 cm contrapiso + 15 cm laje de concreto;
- Paredes: 13 cm (tijolo cerâmico de 6 furos 9x14x24 cm com reboco interno e externo) com $U=2,39\text{W/m}^2\text{K}$ e capacidade térmica= $150\text{kJ/m}^2\text{K}$;
- Portas externas: 2 de 0,80x2,10 m, madeira com $U = 1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- Portas internas: 0,80x2,10 m, madeira com $U = 1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- Cobertura: 2 águas, telha cerâmica + ático forro em PVC. Inclinação de $23,6^\circ$. Estrutura do telhado em madeira, $U=1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$, capacidade térmica= $21 \text{ kJ/m}^2\text{K}$; e telha com $\alpha = 0,3$;

- Janelas: sala de estar e quartos: 1,50 m², 2 folhas de correr, peitoril=1,10 m; cozinha: 1,20 m², 2 folhas de correr; banheiro: 0,48 m², janela basculante com esquadria, peitoril=1,50 m;
- Janelas sem venezianas;
- Vidro: 4 mm transparente;
- Densidade de potência instalada de iluminação: Sala e Dormitórios=5 W/m²;
- Esquadrias em alumínio.

3.2 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE EE

Existem diversas maneiras de se aplicar estratégias de eficiência energética em uma edificação. As medidas foram categorizadas em três grupos (Tabela 2) e foram aplicadas de forma isolada, em duplas e todas em conjunto, gerando, assim, múltiplos casos de estudo de custo-benefício na aplicação de medidas de eficiência energética.

Tabela 2 - Categorias das medidas de EE

Tipos de medidas	Função	Estratégia aplicada
Medidas passivas sem custo adicional	Reduzir ou aumentar o ganho de calor	Mudar orientação
		Reduzir absorvância (0,3)
Medidas passivas com custo adicional	Reduzir ou aumentar o ganho de calor	Isolar a envoltória
Medidas ativas (Equipamentos eficientes nível "A")	Reduzir o consumo de energia	HVAC

Fonte: Autoria Própria (2020)

A primeira categoria a ser aplicada são as estratégias de projeto, sendo decisões que o arquiteto pode adotar, não exigindo um custo adicional, podendo interferir no consumo de energia elétrica da edificação. A primeira estratégia é referente ao posicionamento da edificação no terreno. Caso as aberturas estejam voltadas para o sul, por exemplo, o ganho de calor solar será menor, se comparado ao modelo voltado a oeste. Poderia ser alterado também as relações de tamanho e forma, porém optou-se por manter a mesma configuração nesta pesquisa.

A segunda estratégia diz respeito à aplicação de cores claras com absorvância de 0,3 na telha da cobertura. A segunda categoria também se refere a decisões que cabem ao arquiteto, mas possuem um custo adicional. Para controlar o ganho de calor, será aplicado

isolamento na envoltória (paredes e cobertura). A terceira categoria é a substituição dos equipamentos nível “C” por equipamentos nível “A”, do ar condicionado.

As estratégias foram simuladas de acordo com as categorias e os custos das medidas foram acrescidos ao valor total, conforme forem aplicadas. Dessa forma, será verificada a influência do custo no consumo de energia.

Nesse quadro, foram determinadas cinco categorias de alterações na edificação: orientação; absorvância das telhas; sistema construtivo da parede e a divisão da cobertura em duas partes: forro e telha. Foram consideradas as quatro orientações principais (Norte, Sul, Leste e Oeste); duas absorvâncias (0,3 e 0,7); seis sistemas construtivos de parede (tijolo de 6 furos, bloco de concreto, tijolo de 6 furos com EPS, tijolo de 6 furos com lã de rocha, bloco de concreto com EPS, bloco de concreto com lã de rocha); três tipos de forro (PVC, de gesso e laje) e dois tipos de telha (cerâmica e fibrocimento). As propriedades dos materiais estão no Anexo A. As combinações desses cenários resultaram em um total de 576 modelos, e para a identificação dos mesmos, criou-se um sistema de numeração presente na Tabela 3.

Tabela 3 - Sistema numérico dos modelos.

	Descrição	Numeração
Orientação	Norte	1XXXX
	Sul	2XXXX
	Leste	3XXXX
	Oeste	4XXXX
Absortância	0.3	1XXX
	0.7	2XXX
Sistema construtivo das paredes	Tijolo 6 furos	1XX
	Bloco de concreto	2XX
	Tijolo 6 furos + EPS	3XX
	Tijolo 6 furos + lã de rocha	4XX
	Bloco de concreto + EPS	5XX
	Bloco de concreto + lã de rocha	6XX
Forro	PVC	1X
	Gesso	2X
	Laje	3X
Telha	Cerâmica	1
	Fibrocimento	2
COP	3.24	XXXXXA
	2.82	XXXXXC

Fonte: Autoria Própria (2020)

Como exemplo, o modelo referencial descrito no item 3.1 é o modelo 11111. Outro caso é o modelo 32412, que conta com a fachada principal voltada ao Leste, absorvância de 0.7, paredes de tijolo simples com lã de rocha, forro de PVC e telha de fibrocimento. O COP do sistema de eficiência do ar condicionado considerado como C de 2,82 e o A de 3,24 (XXXXXC e XXXXXA). Assim, o modelo 11111A é o modelo referencial com ar condicionado de COP 3,24 e o 11111C é com COP 2,82.

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

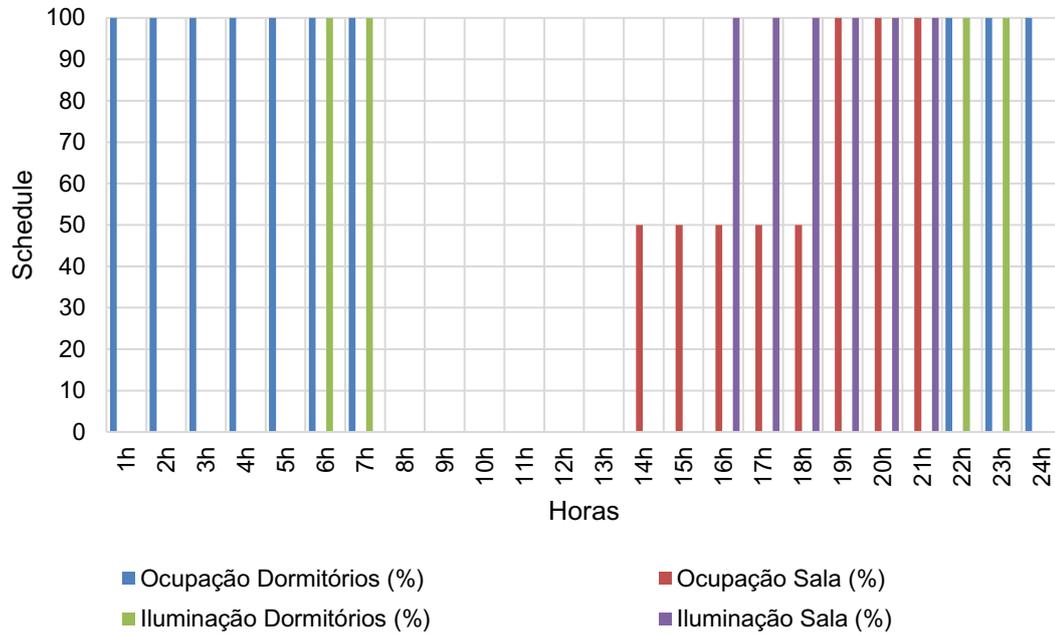
A simulação passou por duas etapas: a simulação da habitação para obter o do consumo de energia elétrica e a simulação da energia de geração elétrica pelos painéis FV.

3.3.1 Simulação do edifício

A análise do consumo é baseada na descrição física do prédio, no sistema de aquecimento ou resfriamento e nas cargas internas. O programa escolhido para o desenvolvimento dessa pesquisa foi o EnergyPlus, distribuído de forma gratuita pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e amplamente utilizado nas pesquisas de simulação termoenergéticas. O software usa os arquivos de entrada IDF e EPW que são basicamente uma interface de software, que introduz dados sobre a arquitetura e o clima no qual o edifício está inserido. Os arquivos IDF contêm dados técnicos sobre os materiais da envolvente do edifício, sistema HVAC, entre outros parâmetros, enquanto o EPW contém os dados meteorológicos. No modelo simulado, a transferência de calor com o solo foi modelada com o objeto GroundDomain: Slab.

Para ter uma estimativa significativa da demanda de energia requerida por uma casa, deve-se, primeiramente, levar em consideração o horário de ocupação. O perfil de ocupação diária da residência foi definido nesta análise para duas pessoas por quarto, totalizando, assim, quatro pessoas, de acordo com a Instrução Normativa do Inmetro para Edificações Residenciais - INI-R (CB3E, 2018), assim como os demais parâmetros de simulação. Dessa forma, o funcionamento dos aparelhos só será ativado no momento em que houver ocupação nos ambientes. A simulação foi realizada por um período de um ano usando um intervalo de tempo de 1h. Os padrões de ocupação e iluminação estão descritos na Figura 13, o padrão de uso e densidade das cargas internas, na Tabela 4 e as taxas metabólicas, na Tabela 5.

Figura 13- Padrões de ocupação e do sistema de iluminação para dias de semana e finais de semana



Fonte: Adaptado de (CB3E, 2018)

Tabela 4 - Padrão de uso e densidade de cargas internas de equipamentos

Ambiente	Período de uso	Potência (W)
Sala	14h às 21h59	120

Fonte: (CB3E, 2018)

Tabela 5 - Taxas metabólicas para cada atividade

Ambiente	Atividade realizada	Calor Produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1.80m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

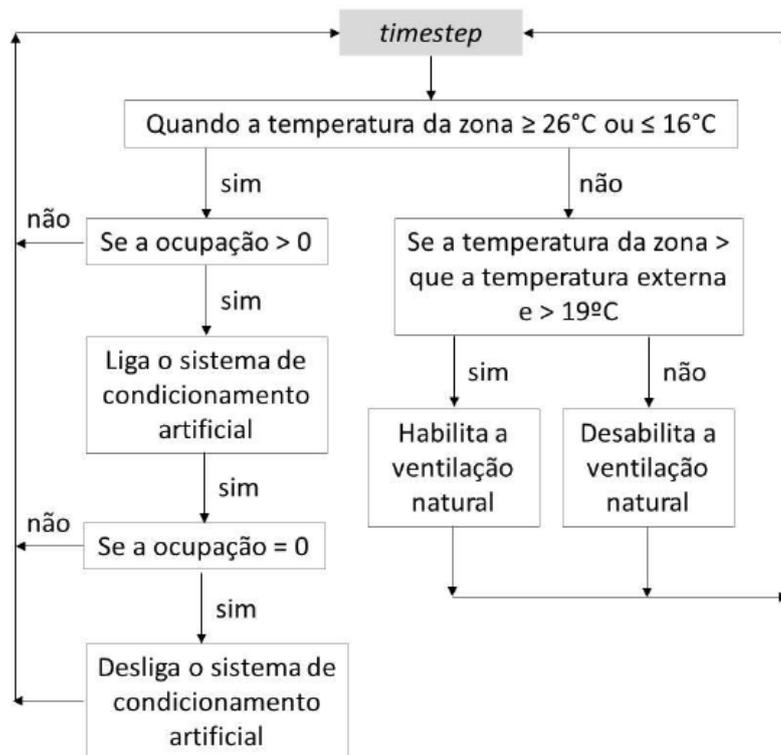
Fonte: (CB3E, 2018)

A única exceção será o condicionamento de ar que irá variar de acordo com o termostato adotado, porém de forma restrita ao período das 21h às 08h. Os sistemas de aquecimento e resfriamento não funcionam quando a temperatura do ar nos dormitórios estiver entre 16°C e 26°C de acordo com o sistema de ventilação híbrida que combina a ventilação natural e o sistema de condicionamento de ar disponibilizado pelo LABEEE, sem o uso de persianas. O uso de ar condicionado pode não ser comum em habitações de interesse

social, no entanto, como não há uma forma de mensurar o custo do desconforto, assumiu-se o uso do condicionamento para os dois dormitórios.

O sistema de condicionamento de ar é controlado de acordo com a temperatura interna do ambiente analisado, como especificado, e com as condições de limites de aceitabilidade do uso da ventilação natural. Quando a temperatura interna do ambiente analisado extrapola essas condições, o algoritmo deve parar a simulação de ventilação natural e iniciar a simulação com o uso do sistema de condicionamento de ar. O sistema de condicionamento de ar funciona somente quando os ambientes são ocupados. Para o desconforto por calor, adota-se que a partir da temperatura de 26°C, o sistema de resfriamento é acionado. Para o desconforto por frio, adota-se que a partir da temperatura de 16°C, o sistema de aquecimento é acionado. O fluxograma do funcionamento do algoritmo está na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do algoritmo de controle da integração do sistema de ventilação natural e do sistema de condicionamento artificial.



Fonte: (CB3E, 2018)

Os materiais utilizados nas simulações (Tabela 3) estão presentes em uma biblioteca de materiais (WEBER et al., 2017) e foram calculados por sistema de equivalência, estando os dados detalhados em anexo. Os procedimentos feitos para a determinação do elemento

construtivo equivalente são realizados de tal forma que as grandezas térmicas (Capacidade térmica) e (Resistência térmica) sejam próximas, ou iguais, ao modelo de referência. Para isso, primeiro calcula-se a resistência e a capacidade térmica total do modelo de referência de acordo com o método de cálculo proposto na NBR 15220 (ABNT, 2005). Baseado nos dados da capacidade térmica total é possível determinar uma nova espessura das camadas do material para o modelo equivalente e através da resistência térmica total do elemento é possível definir uma condutividade equivalente para a câmara de ar do modelo equivalente. Neste modelo equivalente, as camadas do elemento são distribuídas perpendicularmente ao fluxo de calor (WEBER et al., 2017).

3.3.2 Simulação do sistema FV

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado por meio do software PVSyst, que leva em conta os dados climáticos do local e técnicos dos painéis. Foram considerados as perdas que ocorrem na parte elétrica do sistema, a sujeira que pode se acumular e sem a influência do sombreamento do entorno.

Para realizar o cálculo da potência gerada pelos painéis, são necessários dados diários de radiação solar incidente. Os valores das médias mensais do total diário da radiação solar (kWh/m²/dia), em todos os meses do ano, são obtidos por meio do arquivo climático existente. Nesse caso foi adotado o mesmo arquivo utilizado na simulação da etapa anterior, para que os dados de radiação fossem equivalentes. Por meio dos dados de inclinação e orientação da residência, o PVSyst simula a potência necessária para os painéis. O consumo gerado pelos painéis é para que supra a diferença do edifício referencial e o edifício com as estratégias de EE. Será considerada também a degradação que o painel sofre, que pode variar de 0,5% a 1% ao ano, dependendo da marca do painel, mas, para a padronização na pesquisa, foi fixada em 1%. Os painéis escolhidos são da marca Canadian modelo CS6K - 260P-AG 1500V e o inversor da marca ABB e modelo UNO-DM-1.2-TL-PLUS.

3.4 CUSTO DA EDIFICAÇÃO PELO CICLO DE VIDA

Os custos foram considerados para o ciclo de vida da construção, sendo assim, foram calculados em três conjuntos: investimento inicial, manutenção e energia. Para tal, foi utilizada a tabela TCPO (Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos) como referência para os valores, sendo estas tabelas atualizadas anualmente. Ademais, o investimento inicial conta com o valor gasto com a construção, e nos modelos com a presença

de estratégias de EE, os valores foram acrescidos com os custos de implementação das estratégias.

A manutenção do sistema conta com valores referentes ao reparo de componentes dos sistemas de fornecimento de energia, a instalação, além de outras particularidades necessárias para um bom funcionamento do edifício e conforto de seus usuários. Como o custo da energia é uma variável que sofre grande oscilação, foram verificadas algumas perspectivas de variabilidades desse valor.

Para a comparação na pesquisa, foram escolhidos dois modelos: o modelo com menor custo e o modelo com maior eficiência energética, realizando, assim, o dimensionamento do sistema FV e a análise da viabilidade econômica.

3.5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E SENSIBILIDADE DO MERCADO PARA TAXAS DE JUROS, VARIAÇÃO DOS PREÇOS DA ENERGIA E OUTROS PARÂMETROS

A viabilidade financeira de um investimento é estudada dentro de um prazo estipulado pelo investidor, na qual se estima saber se o valor aplicado vale mais do que uma aplicação desse mesmo valor no mercado com taxas mínimas de atratividade (HIRSCHFELD, 2000). A viabilidade financeira será calculada pelo Valor Presente Líquido – VPL, que tem como finalidade determinar o valor do investimento com todos os descontos no momento inicial do investimento através da equação 1:

$$VPL = \sum_0^n \frac{C}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Onde:

VPL = Valor presente líquido

n = número de períodos envolvidos

C = valores envolvidos no fluxo de caixa

i = taxa mínima de atratividade (TMA)

A Taxa de Mínima Atratividade (TMA) adotada foi a taxa do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC), calculada pelo Banco Central do Brasil para o mês de janeiro de 2020 de 4,5%. Dessa forma, o valor resultante do VPL é um valor corrigido, sendo este adotado para o cálculo do prazo de retorno do investimento descontado. Esse valor foi escolhido pois leva em consideração a taxa de desconto no fluxo de caixa futuro. Foi levado

em conta, também, o valor da inflação sobre os custos da edificação. Para este fim, foi utilizada a média dos últimos 10 anos (5,7%). O valor base usado para a potência instalada do sistema FV foi de R\$ 5,00/Wp.

Outro indicador de viabilidade econômica é a Taxa Interna de Retorno (TIR), uma medida que demonstra o quanto rende um investimento em um determinado período de tempo. Para esta pesquisa, foi adotado um período de 25 anos, baseado no período de vida útil das placas fotovoltaicas, considerando as manutenções necessárias para o funcionamento do sistema, como a limpeza anual e a troca dos inversores de 8 em 8 anos. Para um empreendimento ser rentável, o TIR deve ser igual ou maior que a TMA. Todo investimento é feito esperando um retorno, porém o mercado financeiro está em constante mudança, por isso existe a necessidade da análise da sensibilidade, feita com diferentes cenários. Tal análise ajuda na tomada de decisões ao serem examinadas eventuais alterações dos valores (HIRSCHFELD, 2000). Os parâmetros abordados para essas mudanças são a variação do preço de energia e as taxas de juros.

Outro fator importante na tomada de decisões é o tempo de retorno do valor investido, também chamado de payback, que apresenta os indicadores do prazo de retorno do investimento.

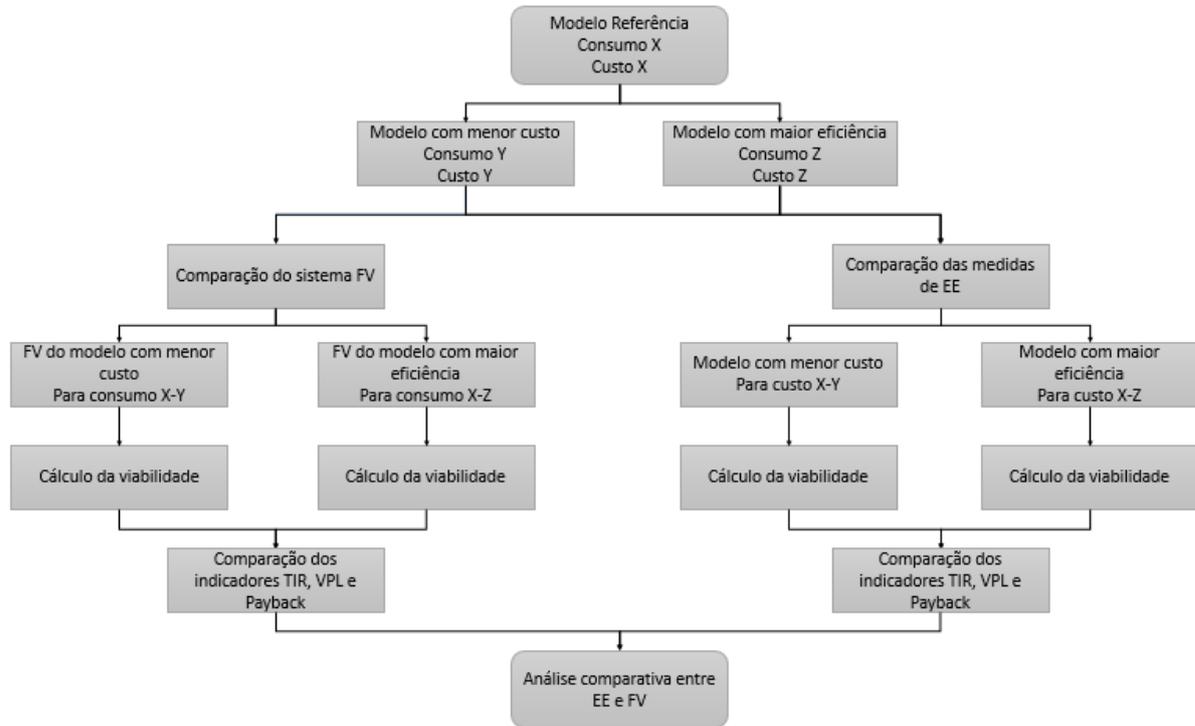
Nesse contexto, foram considerados quatro cenários: o aumento da tarifa da energia em 5% e 10% ao ano e a taxa de juros atual 4,5% e de 9,5%. Gerou-se, desta forma, o cenário 1, com Selic atual e aumento de 5% da energia; cenário 2, com Selic atual e aumento de 10% da energia; cenário 3, com Selic de 9,5% e aumento de 5% e o cenário 4, com Selic de 9,5% e aumento de 10% de energia.

3.6 COMPARAÇÃO DA AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A comparação da avaliação econômica é realizada com base nos valores investidos (custo inicial e operação da edificação) por meio dos indicadores VPL, TIR e Payback. O modelo com menor custo e o modelo com maior eficiência são comparados entre si usando como base o modelo referencial, ou seja, o valor de economia de energia com relação ao modelo referência. Para o dimensionamento do sistema FV essa diferença de consumo é considerada, tendo o custo necessário para o dimensionamento do sistema para suprir a economia do consumo do modelo mais eficiente e comparar com o valor investido na edificação para implementação das medidas de EE. (Figura 15). Sendo que o modelo de

menor custo não é o que menor eficiência e o modelo com maior eficiência não é o modelo com maior custo.

Figura 15- Diagrama da comparação entre os custos da aplicação de EE e FV em uma casa



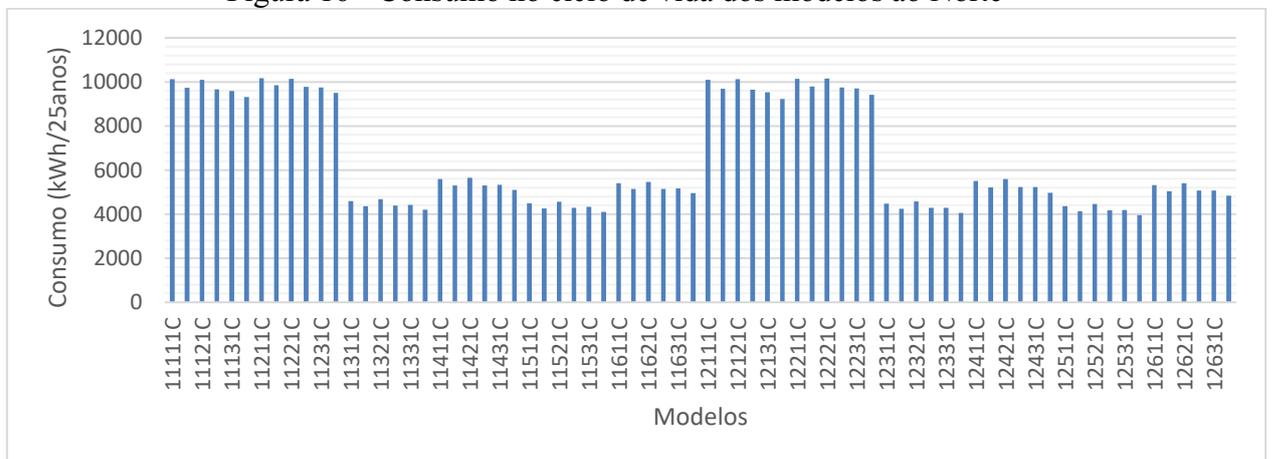
Fonte: Autoria Própria (2020)

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA

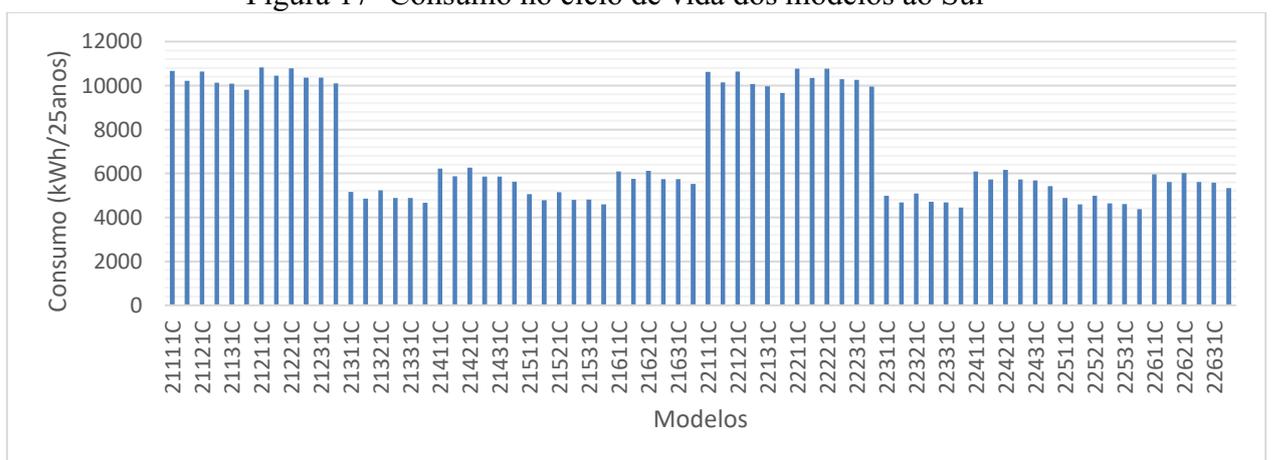
A primeira atividade realizada nessa pesquisa foi a simulação termo energética. O output requerido e analisado foi do consumo referente à carga térmica para refrigeração e aquecimento, pois os dados de consumo dos equipamentos e iluminação, nesse caso, são fixos, não sofrendo influência das mudanças propostas nos modelos. Os consumos dos modelos seguem nas Figuras 16, 17, 18 e 19, sendo respectivamente os modelos voltados ao Norte, Sul, Leste e Oeste.

Figura 16 - Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Norte



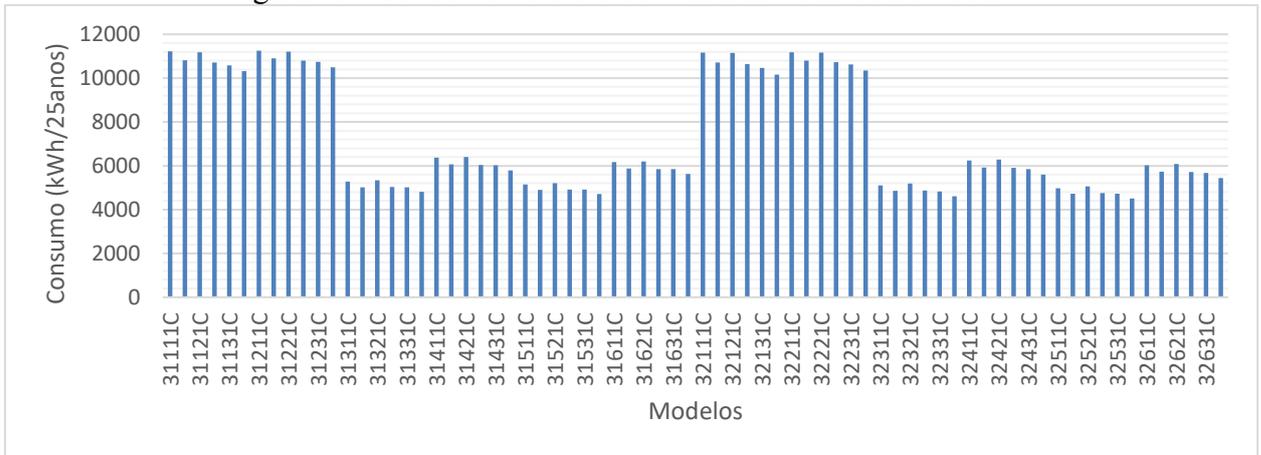
Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 17- Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Sul



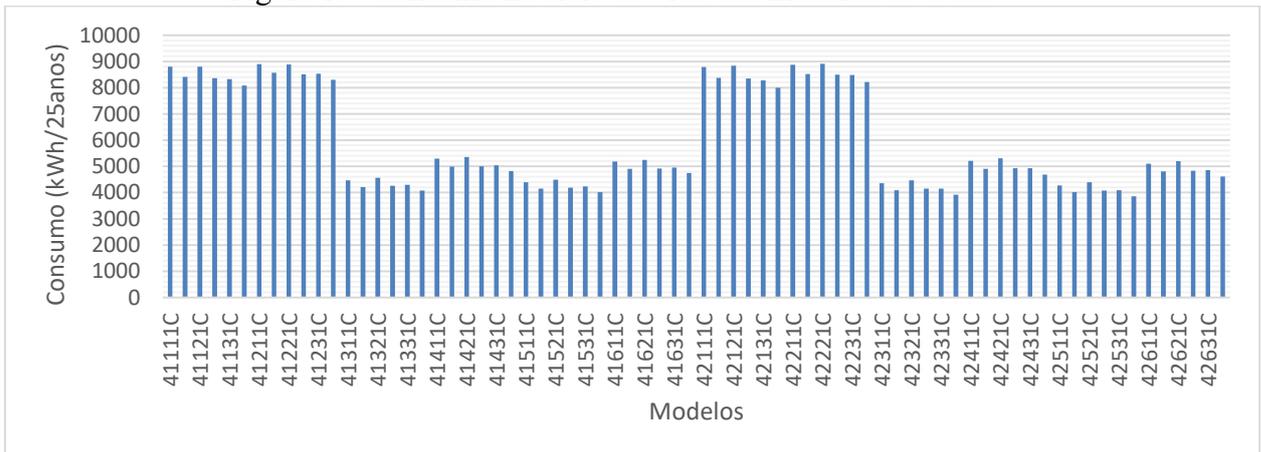
Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 18 - Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Leste



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 19- Consumo no ciclo de vida dos modelos ao Oeste

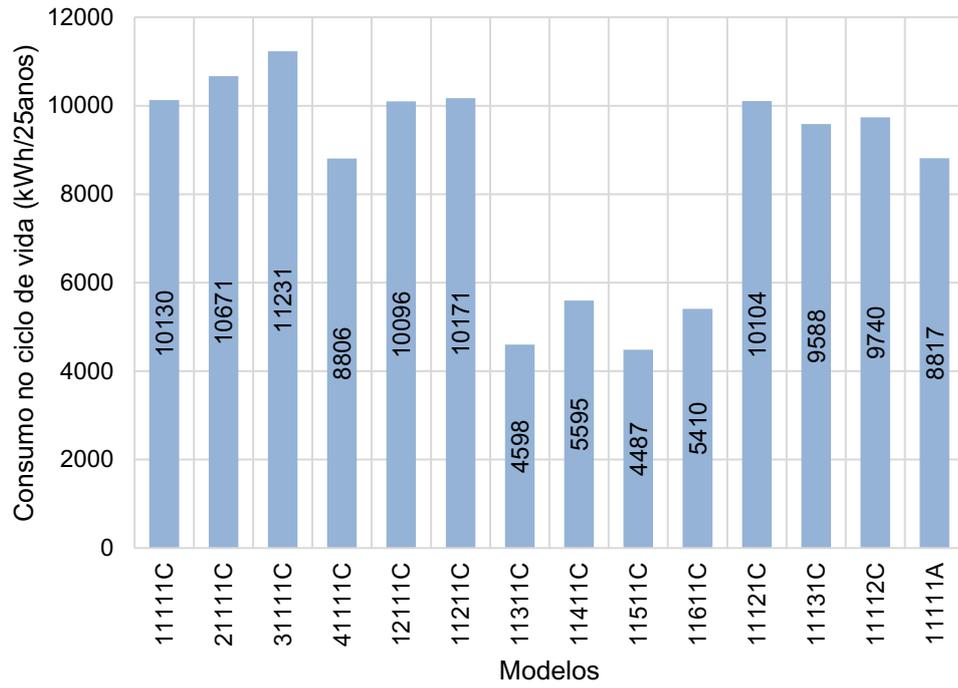


Fonte: Autoria Própria (2020)

Com o propósito de demonstrar a influência de cada medida isoladamente, para isso, 13 modelos foram escolhidos e comparados com o modelo base (11111C), ao mudar apenas a orientação tem-se os modelos 21111C, 31111C e 41111C, ao mudar a absorvância o modelo 12111C, ao mudar o sistema construtivo tem-se os modelos 11211C, 11311C, 11411C, 11511C e 11611C, ao mudar o forro os modelos 11121C e 11131C, ao mudar a telha o modelo 11112C e ao mudar o COP do AC o modelo 11111A.

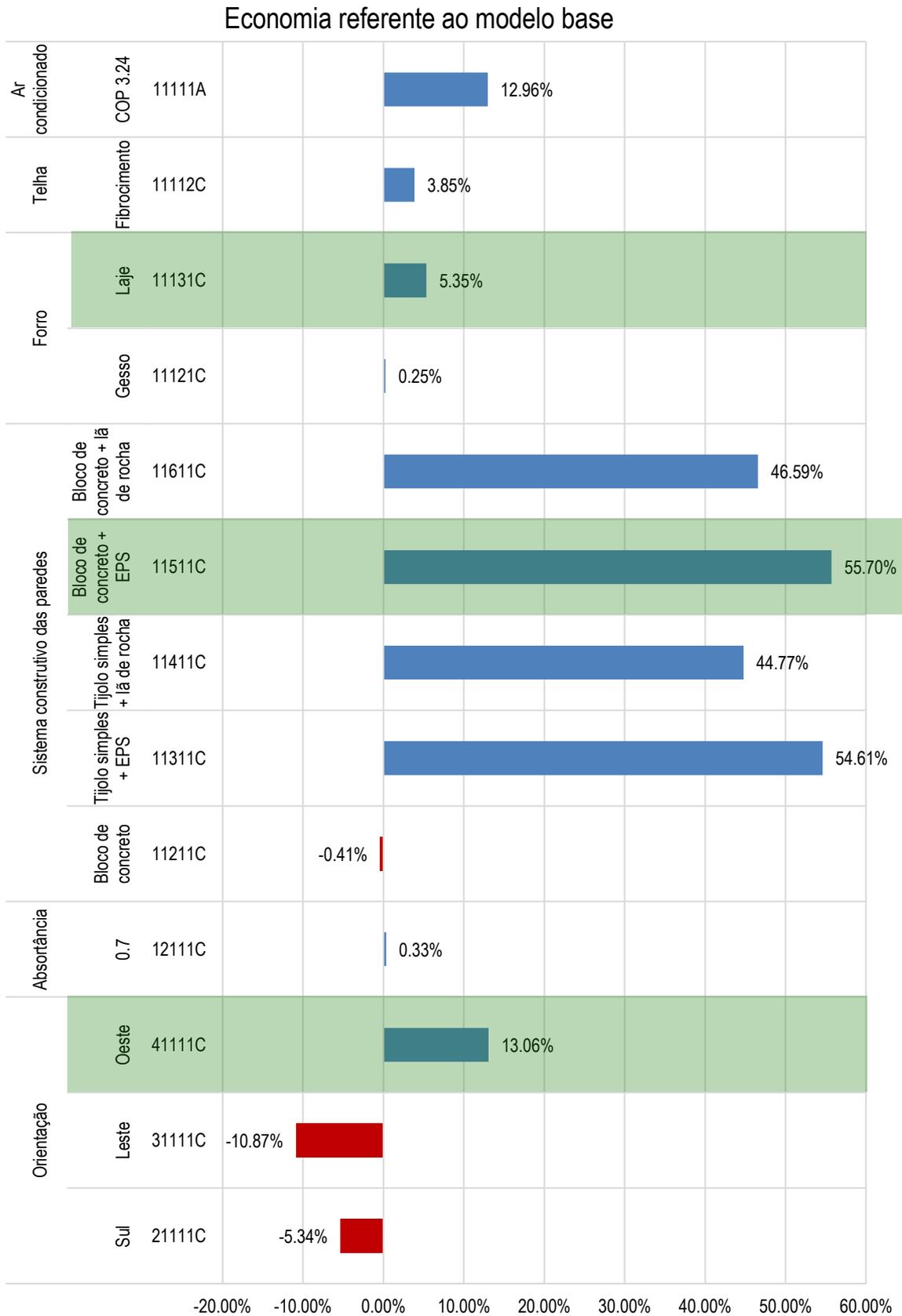
Em uma primeira identificação dos dados tem-se dois gráficos: o primeiro (Figura 20) trazendo os valores absolutos do consumo e o segundo (Figura 21) com os valores percentuais de consumo em relação ao modelo de referência (11111C). Esses valores são a porcentagem da diferença da divisão dos modelos citados pelo modelo referencial.

Figura 20 - Consumo no ciclo de vida



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 21 - Economia do consumo referente ao modelo base



Fonte: Autoria Própria (2020)

Na Figura 21 percebe-se impacto das medidas de EE no consumo de energia. Uma medida projetual como orientação da casa pode variar o consumo em aproximadamente 24% no recorte apresentado. Isso se deve ao posicionamento das aberturas dos dormitórios aonde o ganho térmico tem uma grande importância. O layout da casa estudada o melhor cenário é com a orientação principal voltada ao Oeste conforme destacado e pior ao Leste. No entanto, a mudança da absorvância do telhado é praticamente inexpressiva nesse contexto, isso em razão do clima de Florianópolis, Subtropical Temperado, com temperaturas amenas. Em um estudo de caso em cidades brasileiras com radiação e temperaturas maiores esse valor tende a ser mais expressivo. Os dois itens anteriores são escolhas de projeto, geralmente sem custo adicional. As próximas quatro categorias contam com custos adicionais que serão considerados posteriormente.

Quando analisados os sistemas construtivos das paredes existe uma variação de 56%, essa mudança ocorre por causa do acréscimo do isolamento. As baixas transmitâncias térmicas dos materiais proporcionam melhor desempenho térmico para o cenário analisado, e conseqüentemente, menor consumo de energia. Percebe-se pela Figura 21 que os quatro sistemas com isolamento são os que apresentam maior economia de energia em relação ao modelo base. Como resultado essa categoria é a que mais influencia as nuvens de pontos do item 4.2.

As composições da cobertura sofrem duas mudanças: no forro e na telha. No forro a variação entre os sistemas foi em torno de 5% enquanto na telha de aproximadamente 4%. Esses valores não são tão expressivos quanto ao sistema construtivo das paredes (com economia de 55%), mas não inexpressivo como a absorvância (0,33%).

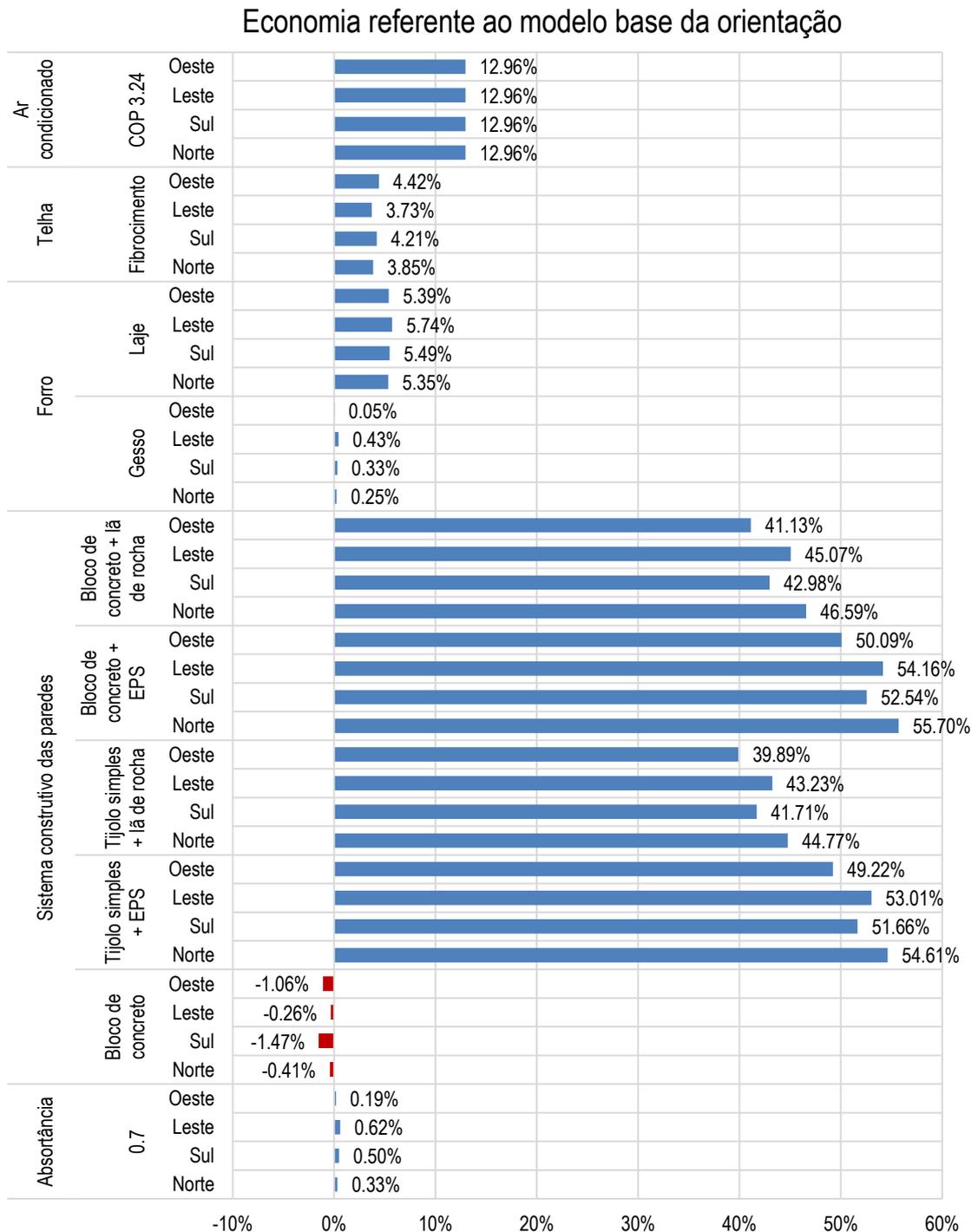
A última categoria observada é uma medida ativa, o AC, ele apontou uma economia próximo de 13% no consumo de energia do modelo A para o modelo C. Tal valor era esperado pois o fator de conversão do modelo de EE A representa em torno de 88% do modelo C.

Os modelos da Figura 21, com exceção do modelo 11111A, são todos do modelo de economia C do ar condicionado. O comportamento da proporção de economia de energia se repete quando considerados os modelos de eficiência do AC A em relação ao modelo 11111A.

Com o objetivo de demonstrar o desempenho das medidas dentro das orientações foram plotadas as economias de energia de acordo com o referencial de cada orientação, ou

seja, para o Sul a referência foi o modelo 21111C, para o Leste 31111C e para o Oeste 41111C. Sabe-se que a orientação influencia a quantidade de carga térmica recebida pela envoltória da edificação como já mencionado, por isso a escolha de demonstrar o comportamento dessa influência dentro de cada orientação (Figura 22).

Figura 22 - Economia do consumo referente ao modelo base da orientação



Fonte: Autoria Própria (2020)

Em valores absolutos os percentuais que mais se diferenciam são os do sistema construtivo das paredes, em torno de 5%, enquanto o ar condicionado não apresenta alteração entre as orientações por ser uma medida ativa de eficiência energética. As outras medidas apresentaram variações menores entre si, em torno de 1% em alguns casos (Bloco de concreto) e em torno de 0,5% em outros, o que pode ser considerado insignificante quando analisado nesse contexto.

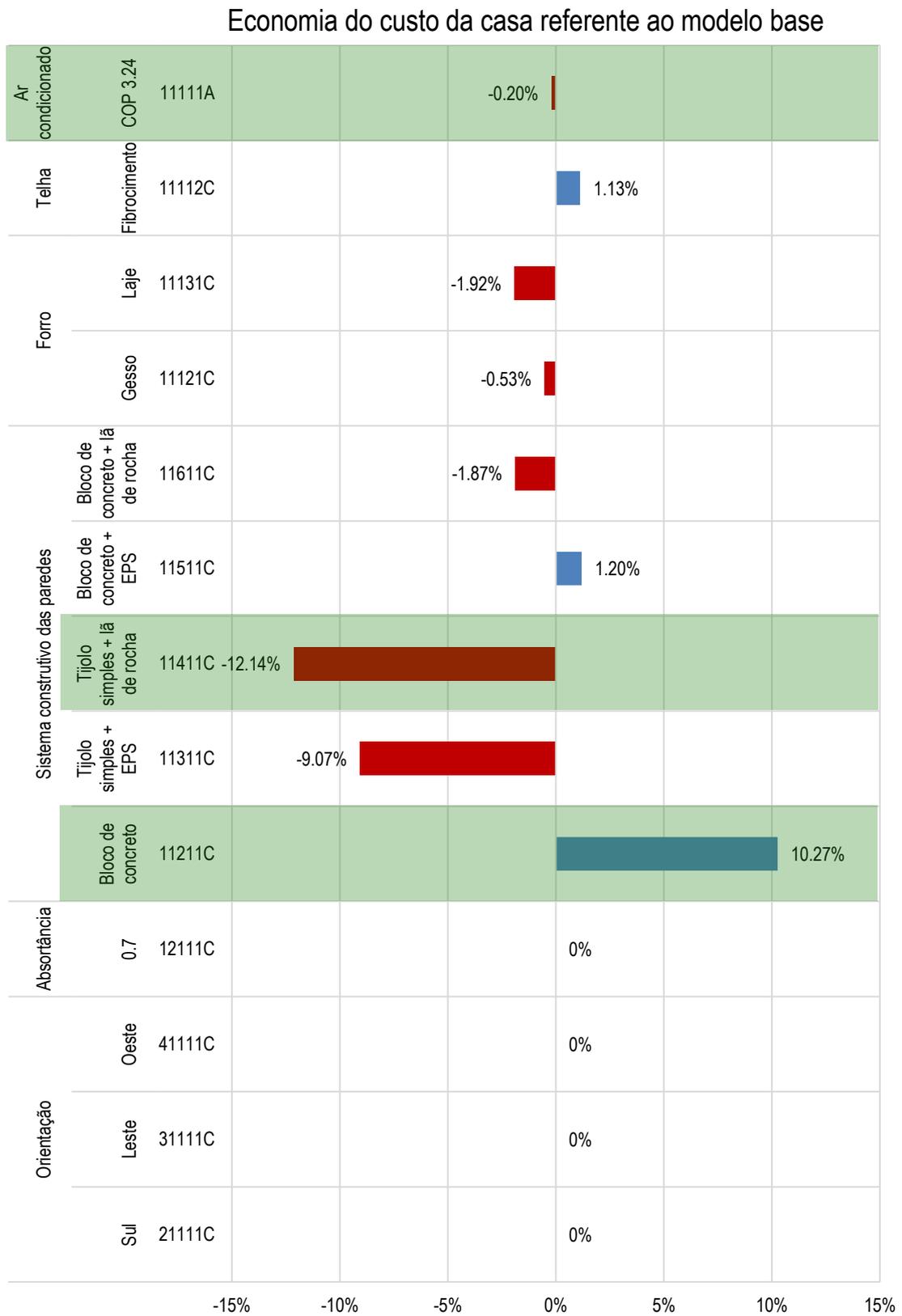
Sabe-se a importância das medidas de eficiência energética e como elas impactam no consumo da edificação. As simulações apresentaram dados de medidas projetuais com relevante impacto no consumo, mas também expõem a influência da envoltória e o do uso de isolamento para climas como o de Florianópolis. A alteração do sistema construtivo gera custos e nesse contexto o cálculo do consumo de energia é o ponto de partida para o cálculo dos custos das medidas. Com esses dados é possível calcular o custo do ciclo de vida da edificação e comparar os benefícios gerados ou não pelas medidas implementadas.

4.2 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

O cálculo do custo do ciclo de vida foi realizado pela TCPO conforme especificado no 3.4. A Figura 23 mostra a relação percentual da implantação de cada medida no custo da casa. Como esperado as mudanças na orientação e na absorvância não apresentam diferença do valor base. As estratégias aplicadas nos modelos que apresentaram um valor menor relativo ao referencial foram no sistema construtivo das paredes: o bloco de concreto e o bloco de concreto com EPS conforme destacado; no tipo de telha, o uso de telhas de fibrocimento também apresentou economia no valor total da casa.

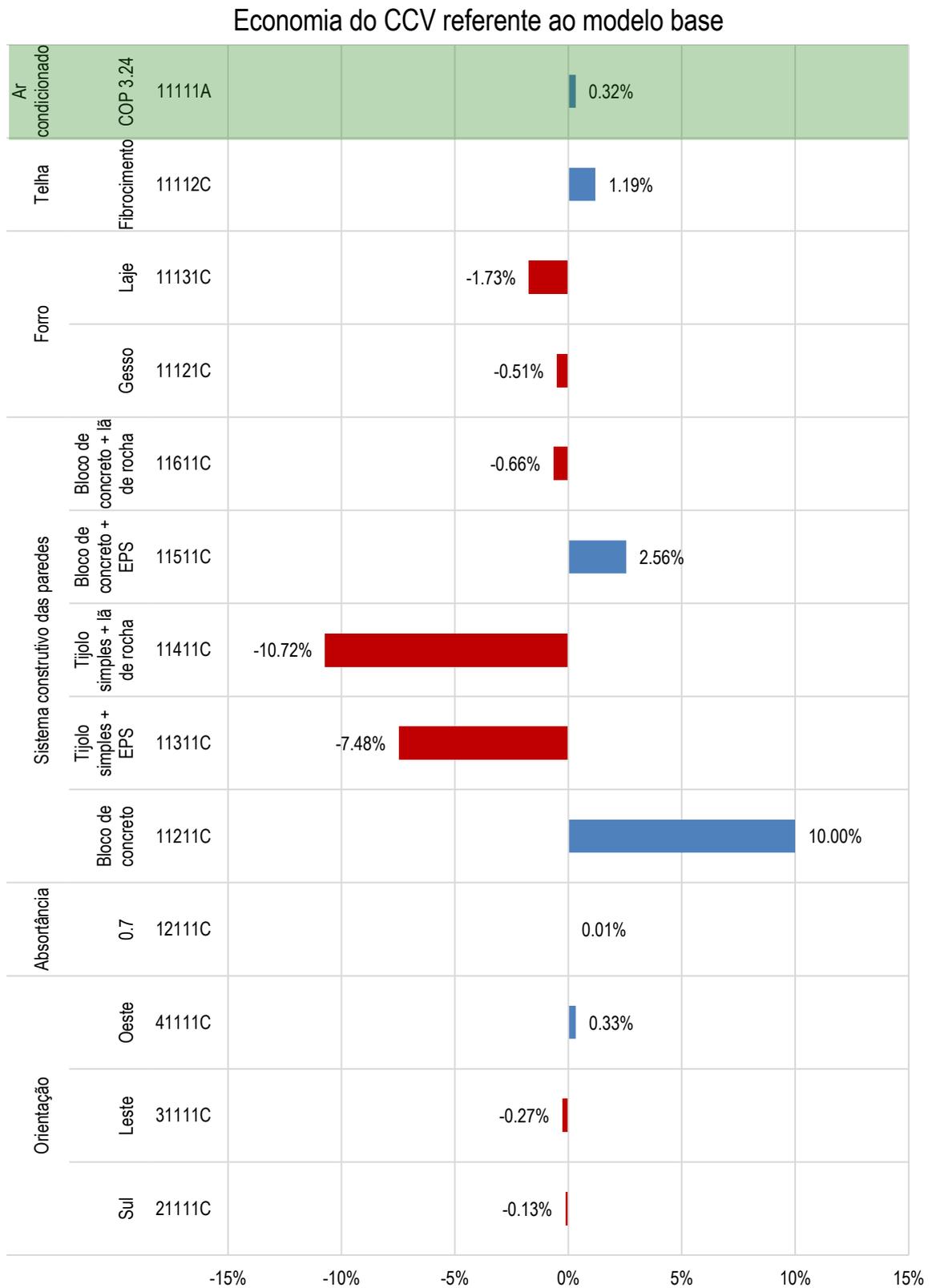
Ao ser considerado o custo do ciclo de vida é adicionado os custos para manutenção do imóvel, e isso inclui o valor gasto com o consumo de energia. Para uma análise geral, não foram considerados os ajustes no preço da energia e nem da inflação no custo da edificação. Nesse contexto, a Figura 23 foi atualizada e observa-se o impacto do consumo no CCV. Estratégias que não apresentavam variação, o caso da orientação e absorvância, nesse cenário já manifestam valores mesmo que baixos. As variações entre os modelos da Figura 23 para Figura 24 foram de 0,33% até 1,59%. A única medida que sofreu alteração passando de negativo para positivo foi o ar condicionado.

Figura 23 - Economia do custo da casa referente ao modelo base



Fonte: Autoria Própria (2020)

Figura 24 - Economia do CCV referente ao modelo base



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 25 apresenta os valores absolutos do CCV e do consumo de energia para carga térmica para aquecimento/refrigeração da edificação de todos os modelos com todas as combinações das estratégias pré-estabelecidas. Esses valores com cada modelo respectivo se encontram em anexo. Repara-se no gráfico quatro principais nuvens, esse agrupamento se forma em volta dos quatro sistemas construtivos que apresentam maior influência no CCV. Os modelos usados para comparação do consumo e do custo de cada medida aplicada de forma individual estão identificados no gráfico. Tem-se a identificação das quatro nuvens formadas sendo nomeadas como I, II, III e IV.

Figura 25 - Valores absolutos do consumo e CCV



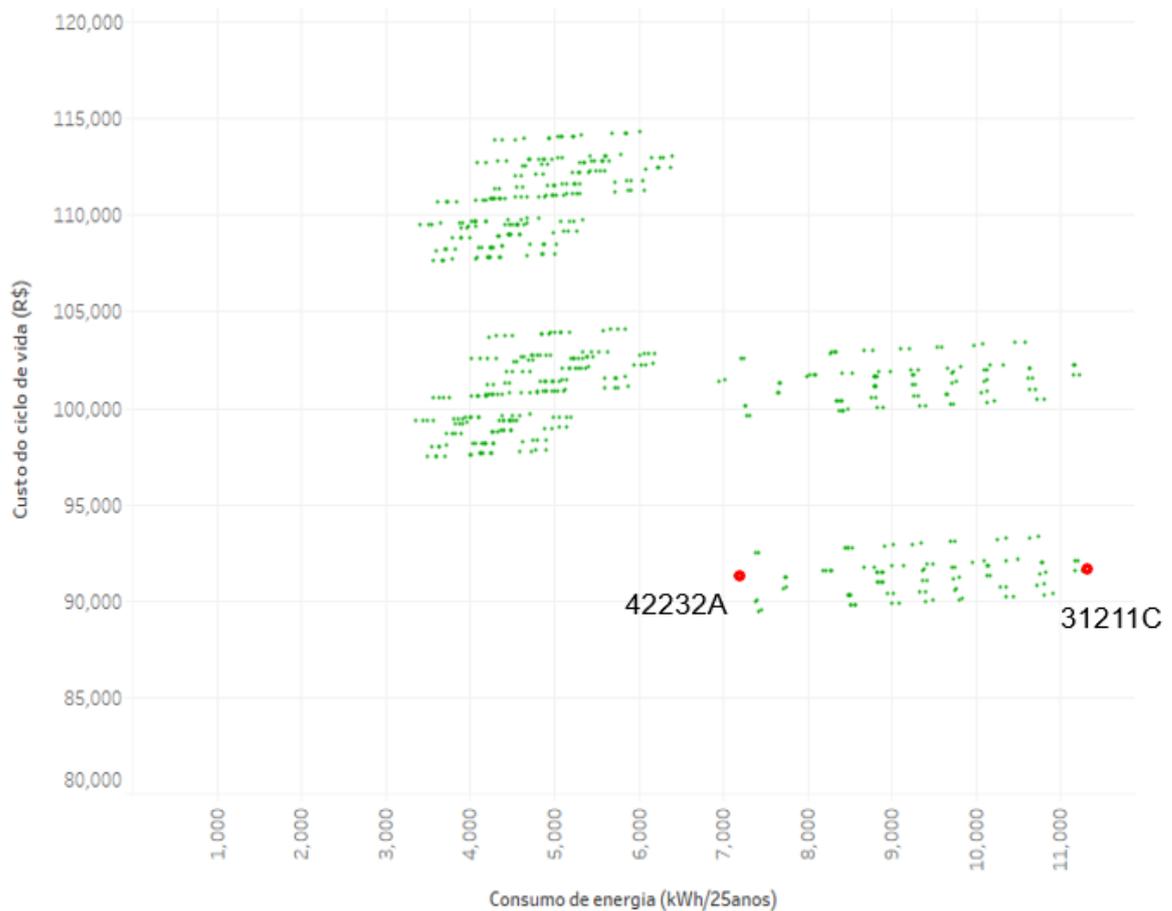
Fonte: Autoria Própria (2020)

Os grupos I e II contam com 192 modelos cada. No grupo I estão todos os modelos dos sistemas construtivos XX3XX e XX4XX, ou seja, do tijolo de 6 furos com adição de isolante. No grupo II estão os modelos construtivos XX5XX e XX6XX, sendo os modelos de

bloco de concreto com adição de isolantes. Nos grupos III e IV estão 96 modelos cada, sendo os modelos de tijolo de 6 furos e bloco de concreto respectivamente.

Os grupos com as melhores circunstâncias são as nuvens II e IV, a nuvem II por ter os menores consumos com menor custo quando comparada ao I e a nuvem IV por ter os modelos com os menores custos. No entanto, vale ressaltar que mesmo sendo os sistemas construtivos a principal influência os outros fatores também são determinantes. Na Figura 26, os dois círculos marcam dois modelos com CCV semelhantes, que exibem valores diferentes de consumo, uma diferença de aproximadamente 4 mil kWh. Os modelos circulado são 42232A e 31211C com o consumo de 7153 kWh e 11260kWh respectivamente. O modelo 42232A conta com orientação oeste com forro de laje e telha de fibrocimento, quando aplicadas em conjunto, as medidas diminuem de forma considerável o consumo sem influenciar tanto no CCV.

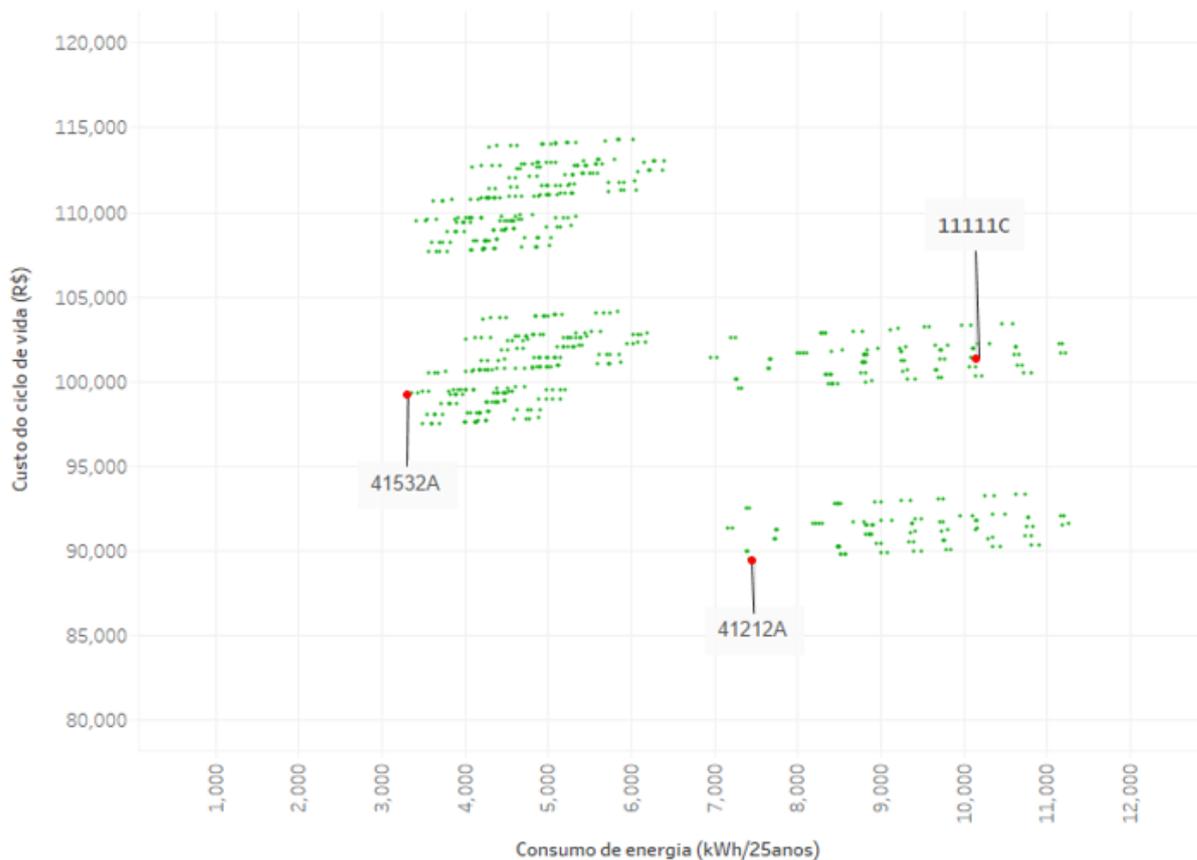
Figura 26 - Valores absolutos do consumo e CCV (marcado)



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 27 apresenta três modelos destacados: o primeiro é o referencial (11111C), o segundo, de menor CCV (41212A) e o terceiro, de maior economia de energia (41532A). Para fins de análise, comparou-se as relações de viabilidade econômica entre as medidas de eficiência energética e sistema de energia fotovoltaica, o modelo com o menor CCV e o modelo com maior economia no consumo de energia, sendo estes os modelos 41212A (88,23% do CCV e 26,75% de economia de energia) e 41532A (97,93% do CCV e 66,81% de economia de energia), respectivamente.

Figura 27 - Valores absolutos de CCV e consumo de energia (modelo referencial, menor CCV e maior economia de energia).



Fonte: Autoria Própria (2020)

O modelo com menor custo do ciclo de vida (41212A) tem as seguintes características: a entrada principal voltada para o oeste, absorvância de 0.3, paredes de bloco de concreto, forro de PVC, telha de fibrocimento e COP de 3.24. O modelo com maior economia no consumo de energia (41532A) conta com as seguintes características: a entrada

principal voltada para o oeste, absorvância de 0.3, paredes de bloco de concreto com EPS, forro sendo de laje de concreto, telha de fibrocimento e COP de 3.24.

Os resultados alcançados mostram a importância da avaliação do custo embutido nas estratégias aplicadas ao longo do ciclo de vida. Às vezes, as estratégias com maior economia de energia quando considerado o ciclo de vida não são as melhores opções do ponto de vista dos custos, o que era esperado.

4.3 ANÁLISE ECONOMICA COMPARATIVA ENTRE FV E EE

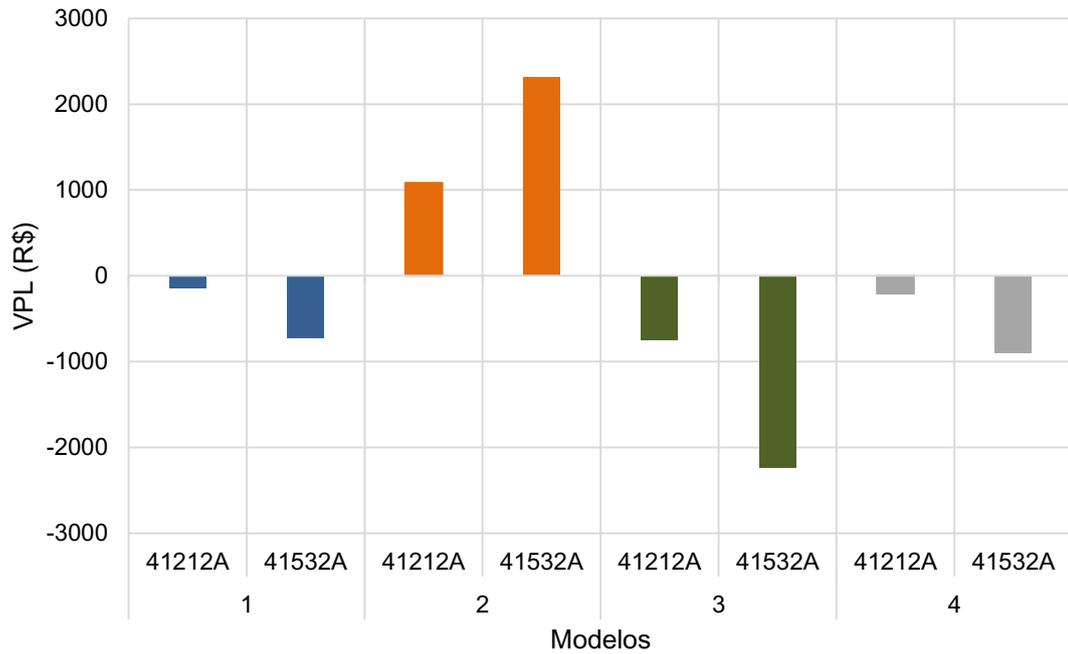
Para o dimensionamento do sistema FV foi considerada a energia economizada no sistema, ou seja, para representar o modelo com maior economia de energia foi dimensionado um sistema que diminuísse em aproximadamente 67% o consumo de energia do edifício referencial. O mesmo se aplica ao de menor custo.

Para o modelo de menor custo (27% de economia de energia) o dimensionamento foi de 222Wp, como não existe painel com essa potência foi admitido um painel de 260Wp. No modelo de maior economia o dimensionamento foi de 552Wp e admitido dois painéis de 260Wp totalizando 520Wp. O valor do investimento inicial do sistema FV foi de R\$ 5,00/Wp conforme explanado na metodologia e para as medidas de EE a diferença do valor do modelo analisado para o referencial.

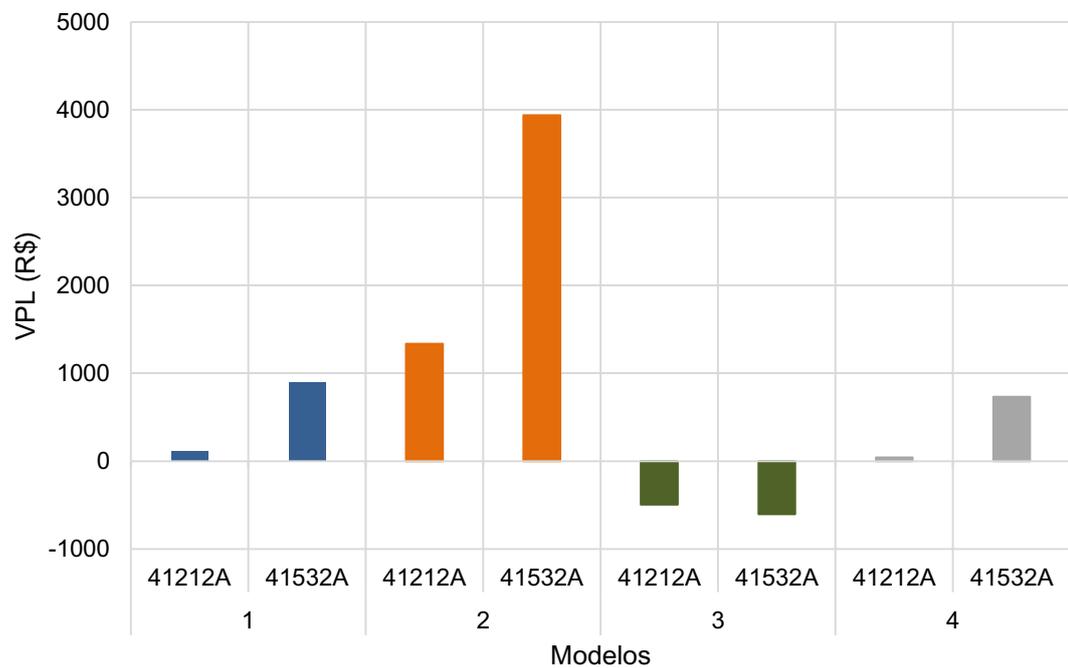
A avaliação foi realizada por meio de três indicadores, o VPL, TIR e o Payback. Para a realização do cálculo da viabilidade, foram considerados dois índices que geraram quatro cenários na sua combinação (de acordo com o item 3.5). Na Figura 28, os cenários se encontram na seguinte ordem: cenário 1, cenário 2, cenário 3 e cenário 4, sendo os valores representantes das medidas de EE o (a) e do sistema FV o (b). Devido ao alto valor do investimento inicial, no caso da aplicação da EE na edificação, apenas o cenário com a taxa de juros baixa e o ajuste da energia alto (4,5% e 10%, respectivamente) teve um valor positivo. Isto ocorre, pois, o reajuste do valor investido é menor e o rendimento com o aumento da energia é maior. O pior cenário é o terceiro, onde a taxa de juros é alta (9,5%) e o reajuste do valor da energia é baixo (5%). Esse foi o único caso negativo para o sistema FV.

O VPL é o valor atualizado do fluxo de caixa, e, para que haja viabilidade econômica, ele deve ser positivo. Quando analisados comparativamente pelo VPL, constata-se que o sistema FV é mais viável economicamente, pois, para uma mesma quantidade de economia de energia, o investimento inicial é menor.

Figura 28 - VPL: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico



(a)



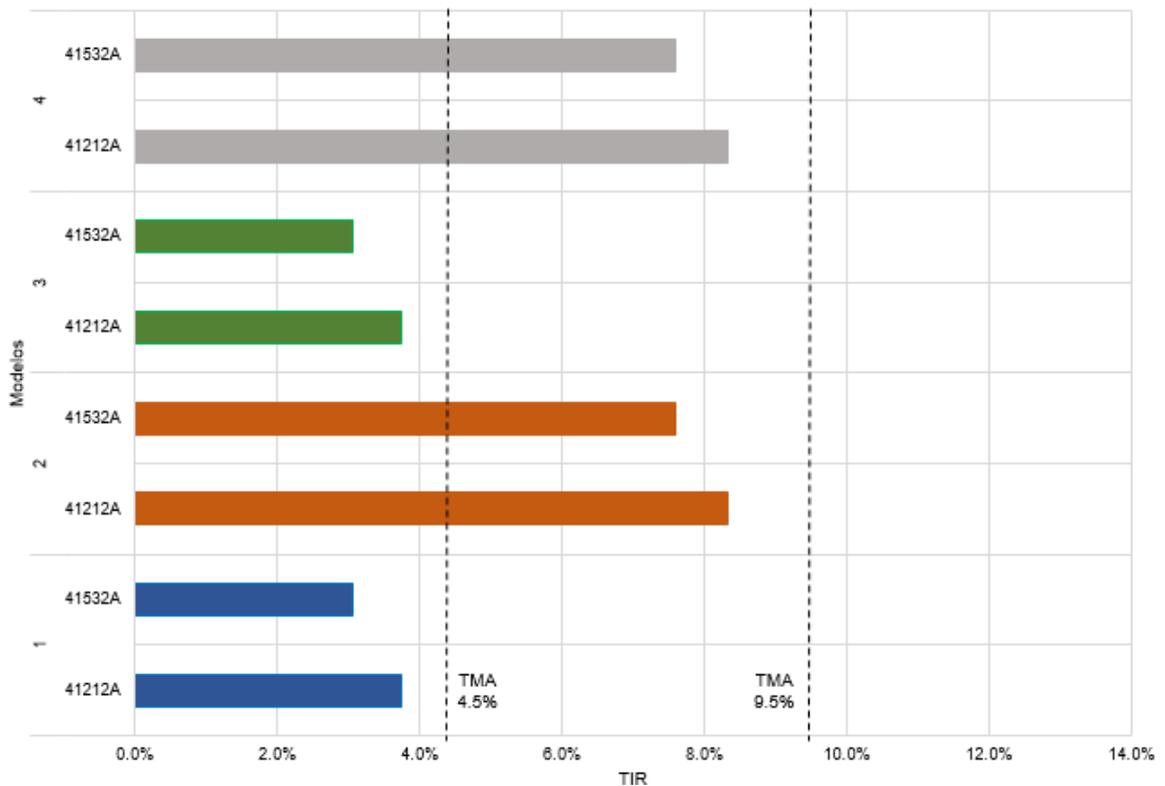
(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

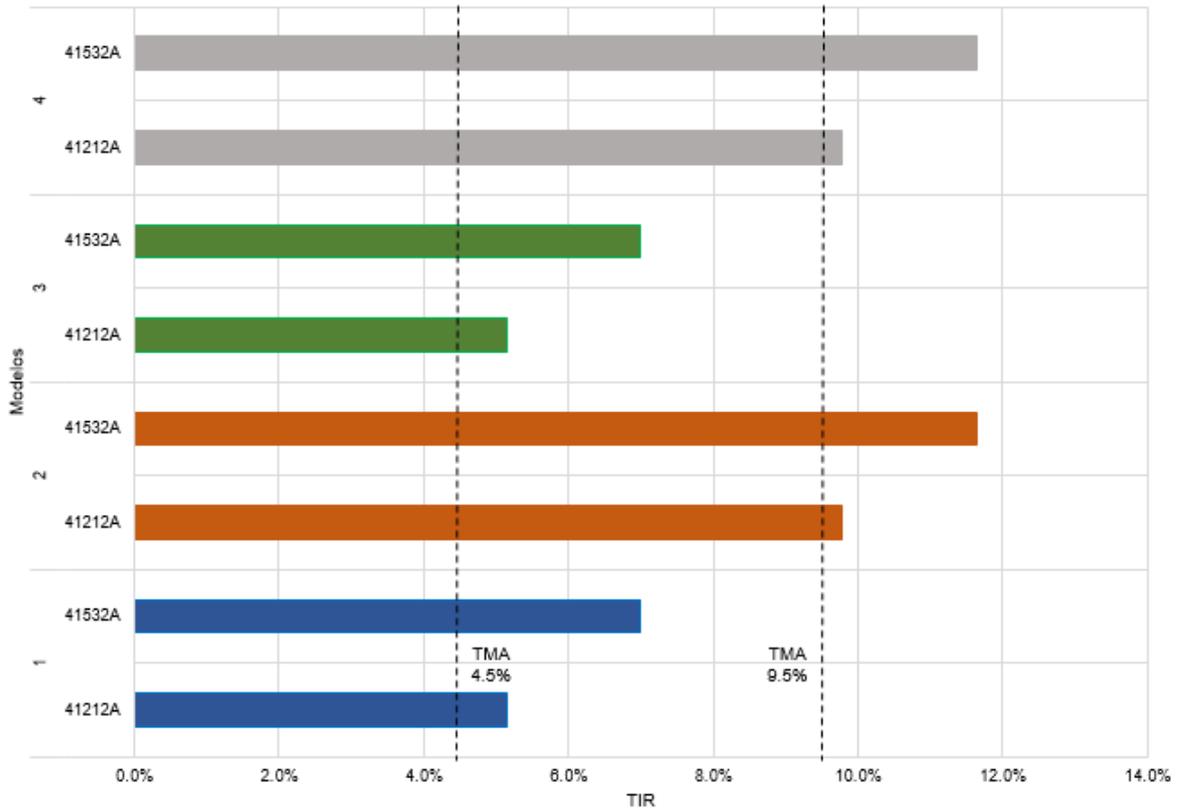
Outro indicador adotado é o TIR e nesse caso, para se considerar a viabilidade, ele deve ser maior que a TMA. Nos cenários 1 e 2 observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, ela foi de 4,5% e nos cenários 3 e 4, de 9,5%. Os valores de TIR se repetem nos

cenários 1 e 3, pois eles não dependem das taxas de juros para serem calculadas, apenas do rendimento e do valor investido. O único cenário que se teve viabilidade econômica pelo cálculo do TIR para EE (a) foi o 2, com 8,3% (41212A) e 7,6% (41532A) contra a taxa de 4,5%. Em todos os outros cenários, o TIR foi menor que a taxa mínima (4,5% e 9,5%). Ao analisar o sistema FV, todos os cenários apresentaram viabilidade, exceto o 3. Os dois índices resultaram na mesma conclusão, que no cenário 2 as medidas de EE são viáveis enquanto não apresenta viabilidade nos outros 3 e o sistema FV apresenta viabilidade nos 3 cenários, com exceção do 3º, sendo corroborado pelos dados.

Figura 29 - TIR: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico



(a)

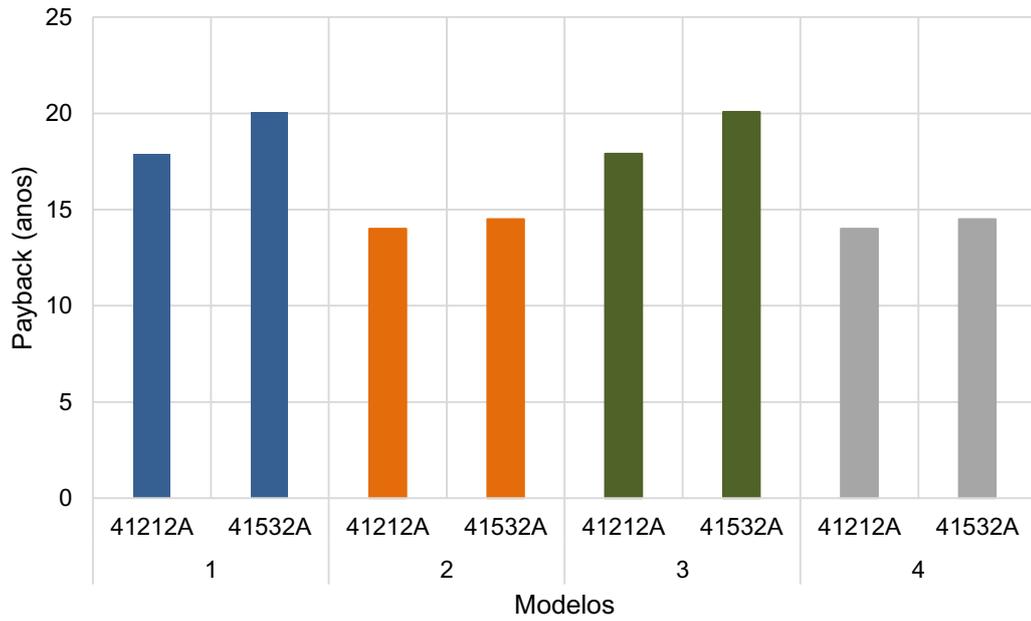


(b)

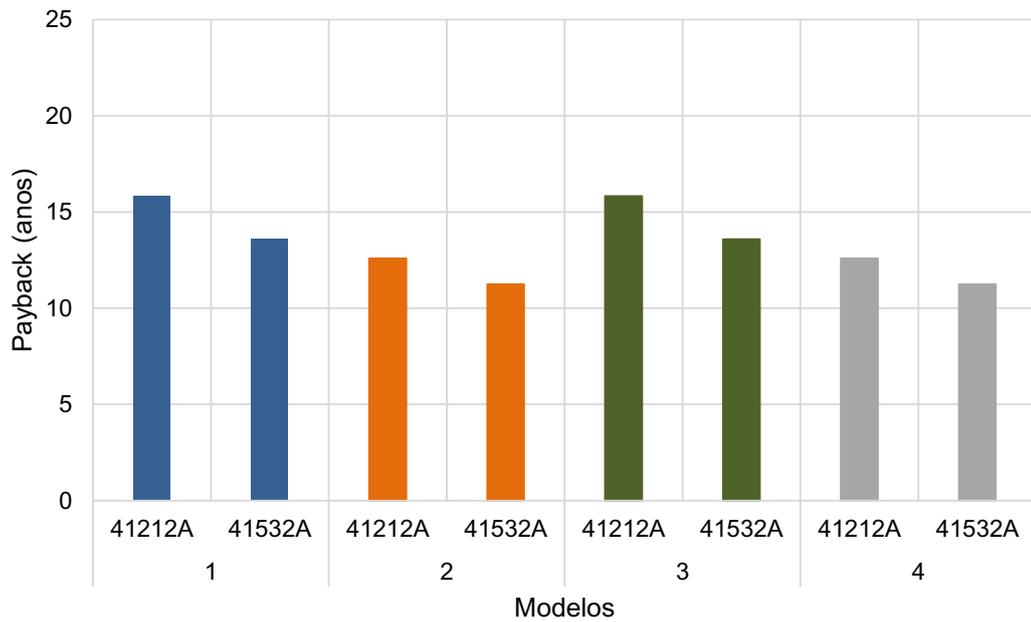
Fonte: Autoria Própria (2020)

O *payback* é o cálculo do tempo de retorno. No geral, é considerado que se o tempo de retorno for menor que o período de vida útil, então o investimento é viável. No entanto, nem sempre isso significa que é algo rentável. Isto é, quando considerados os cenários de investimentos e atualizações dos preços. Esta pesquisa reflete estes casos, pois de acordo com o *payback*, todos os cenários seriam viáveis tendo todos os cenários valores menores que 25 anos (vida útil considerada), como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 30 - Payback: (a) eficiência energética; (b) fotovoltaico



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os indicadores apontam a viabilidade para ambos sistemas no cenário 2. No entanto quando comparados para serem aplicados de forma isolada o sistema FV é melhor do ponto de vista econômico apresentando maior rentabilidade e menor tempo de retorno.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa buscou avaliar as medidas de eficiência energética e os sistemas fotovoltaicos tratando-os como concorrentes pelo ponto de vista financeiro. Para isso, o objetivo foi comparar a relação custo x benefício entre a minimização do consumo de energia e a geração de energia fotovoltaica distribuída em habitações de interesse social unifamiliares.

A primeira parte da pesquisa foi focada na mitigação do consumo da energia. Seis medidas principais foram consideradas, sendo elas: orientação, absorvância, sistema construtivo das paredes, forro, telha e ar condicionado. A combinação dos cenários resultou em 576 modelos que foram simulados no EnergyPlus de acordo com as instruções normativas brasileiras. A segunda parte foi focada nos custos dos cenários para as medidas de EE. Uma vez levantados, os custos com consumo de energia foram acrescentados e o CCV foi calculado. A terceira parte da pesquisa consiste no dimensionamento do sistema FV e a comparação de dois modelos de EE (menor custo e menor consumo de energia) com sistema FV pelo viés financeiro.

Conforme análise dos dados, quando as medidas de EE foram aplicadas isoladamente a medida com maior influência foi o sistema construtivo das paredes (variação de 56%), em segundo lugar a orientação (variação de 24%) e terceiro lugar a eficiência do AC (variação de 13%). Os resultados que abordam os impactos das medidas nos custos da casa demonstraram que o sistema construtivo das paredes obteve maior expressão conforme esperado, no entanto as duas outras medidas com maior influência (orientação e COP) no consumo apresentaram 0% e 0,20%, sendo os menores valores. Quando analisado o CCV o consumo de energia é considerado, dessa forma a diferença para o cenário apenas com os custos não é tão grande, mas está presente, e quando combinadas as medidas de EE a economia de energia se intensifica e o CCV vai aumentando ou diminuindo de acordo com as medidas aplicadas.

A combinação das medidas gerou os 576 modelos que quando plotados analisando o consumo e o custo do ciclo de vida, formou algumas nuvens de pontos por causa das medidas com maior influência. O principal fator causador desses agrupamentos foram os sistemas construtivos das paredes, sendo que a parede de bloco de concreto representou os menores custos. Tal análise aponta como o acúmulo das medidas podem se sobrepor a um mesmo intervalo de custo com consumos expressivamente diferentes. Dentro desses modelos foram escolhidos dois modelos para a análise comparativa de EE com FV, o modelo com menor custo e o modelo com maior economia de energia.

Para o dimensionamento do sistema FV foi estimada a energia economizada com as medidas de EE, isto é, para representar o modelo com maior economia de energia foi dimensionado um sistema que diminuísse em aproximadamente 67% o consumo de energia do edifício referencial. Os sistemas foram dimensionados resultando em um sistema de 260Wp representando o modelo de menor custo e um sistema de 520Wp o de maior economia de energia.

A comparação entre EE e FV foi realizada em quatro cenários diferentes, a taxa de juros, considerada a taxa de atratividade mínima, foi a Selic de 4,5%, o cenário 1 é com a Selic atual e aumento de 5% da energia; o cenário 2 é com a Selic atual e o aumento de 10% da energia; o cenário 3 é com a Selic de 9,5% e o aumento de 5% e o cenário 4, com Selic de 9,5% e o aumento de 10% de energia.

A avaliação foi realizada por meio de três indicadores, o VPL, TIR e o payback. O VPL não demonstrou ser rentável do ponto de vista financeiro as estratégias de EE nos cenários 1, 3 e 4. O único cenário com VPL positivo foi no cenário 2 aonde a taxa de juros é baixa e o aumento da energia alto, sendo o melhor cenário para investimento. No caso do sistema FV apenas o pior cenário não demonstrou viabilidade, o cenário 3 com juros altos e baixo aumento no preço da energia. O TIR demonstrou viabilidade das medidas de EE no cenário 2 devido ao aumento do preço da energia, enquanto o sistema FV teve a TIR maior que a taxa mínima considerada em todos os cenários. Pelo conceito clássico do payback o retorno do investimento deve acontecer em um tempo menor que o da vida útil, nesse contexto em todos os cenários, tanto para as medidas de EE quanto para o sistema FV os períodos de retorno foram menores que 25 anos.

Com essa pesquisa conclui-se que quando tratados como concorrentes pelo ponto de vista financeiro o sistema FV apresenta melhor performance nos indicadores, sendo o mais conveniente para aplicação isolada. No entanto, a pesquisa mostra como medidas com baixo ou nenhum custo podem economizar uma quantidade significativa de energia, devendo sempre esses fatores serem levados em consideração na fase de projeto.

5.1 LIMITAÇÕES

A presente pesquisa conta com algumas limitações listadas abaixo:

- ✓ Realização da comparação isolada das medidas de eficiência e sistemas fotovoltaicos;

- ✓ Estudo apenas do clima de Florianópolis em um país com diferentes climas e níveis de radiação solar;
- ✓ O número de estratégias de eficiência foi limitado e outras medidas poderiam ser aplicadas.
- ✓ Estudo da casa de forma isolada.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros segue:

- ✓ Utilizar as medidas de eficiência e o uso de painéis fotovoltaicos como parceiros e encontrar o equilíbrio em termos de custo benefício;
- ✓ Aplicar a metodologia para outras localidades brasileiras, tendo diferentes cenários e climas;
- ✓ Usar parametrização para aplicar outras estratégias de eficiência energética;
- ✓ Considerar o efeito do contexto urbano no consumo e produção da energia.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15220-2. **Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações**. Janeiro, 2005.
- ABU BAKAR, N. N. et al. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 1–11, 2015.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2012. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2019. **Informações Copiladas e Mapa**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>
- AKOREDE, M. F.; HIZAM, H.; POURESMAEIL, E. Distributed energy resources and benefits to the environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 724–734, 2010.
- ALANNE, K.; SAARI, A. Distributed energy generation and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 6, p. 539–558, 2006.
- ALMEIDA, M.; FERREIRA, M. Ten questions concerning cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation. **Building and Environment**, v. 143, n. June, p. 15–23, 2018.
- AQUILA, G. et al. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. October 2015, p. 1090–1098, 2017.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. **Relatório final 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 294 p.
- BAZILIAN, M. et al. Re-considering the economics of photovoltaic power. **Renewable Energy**, v. 53, p. 329–338, 2013.
- Bloomberg New Energy Finance – BNEF. **Bloomberg renewable energy**. 2015. Disponível em: <<http://www.energytrend.com/taxonomy/term/5748>>
- BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, 2010.
- BRADSHAW, A. Regulatory change and innovation in Latin America: The case of renewable energy in Brazil. **Utilities Policy**, v. 49, p. 156–164, 2017.

BRASIL; MINISTERIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Habitação**. 2009. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/plano-nacional-de-habitacao.html>. 2009.>

BRASIL; MINISTERIO DAS CIDADES. **Ministro das Cidades anuncia novas contratações do MCMV**. 2017. Disponível em: <<http://www.minhacasaminhvida.gov.br/ultimas-noticias/5172-ministro-das-cidades-anuncia-novas-contratacoes-do-mcmv>>

CANDELISE, C.; WINSKEL, M.; GROSS, R. J. K. The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 96–107, 2013.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E. **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2018.

CHOI, G. et al. Prices versus quantities: Comparing economic efficiency of feed-in tariff and renewable portfolio standard in promoting renewable electricity generation. **Energy Policy**, v. 113, n. November 2017, p. 239–248, 2018.

CARTANA, R. P. **Oportunidades e limitações para bioclimatologia aplicada ao projeto arquitetônico**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura. 163p. Florianópolis, SC, 2006.

DALBEM, R. et al. Optimisation of a social housing for south of Brazil: From basic performance standard to passive house concept. **Energy**, v. 167, p. 1278–1296, 2019.

DÁVI, G. A. et al. Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 120, p. 19–29, 2016.

DE LA RUE DU CAN, S. et al. Design of incentive programs for accelerating penetration of energy-efficient appliances. **Energy Policy**, v. 72, p. 56–66, 2014.

DIKAKI, C. et al. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. **Energy**, v. 35, n. 12, p. 5483–5496, 2010.

DIAS, C. L. DE A. et al. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy**, v. 114, n. PB, p. 367–375, 2017.

DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; TETTEY, U. Y. A. Final energy savings and cost-effectiveness of deep energy renovation of a multi-storey residential building. **Energy**, v. 135, p. 563–576, 2017.

EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética. 2015.

FERREIRA, M.; ALMEIDA, M.; RODRIGUES, A. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target. **Energy and Buildings**, v. 133, n. November 2014, p. 724–737, 2016.

GELLER, H. et al. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. v. 32, p. 1437–1450, 2004.

HAMILTON, I. G. et al. Energy efficiency uptake and energy savings in English houses: A cohort study. **Energy and Buildings**, v. 118, n. 2016, p. 259–276, 2016.

HASAN, A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. **Applied Energy**, v. 63, n. 2, p. 115–124, 1999.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. **Energy Policy**, v. 67, p. 612–617, 2014.

HOLMES, M. J.; HACKER, J. N. Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 7, p. 802–814, 2007.

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. RTQ-R**. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **World Energy Outlook 2009**. Paris: IEA International Energy Agency; OECD, 2009.

IRENA: INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY.

The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. 2016.

Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2016/Jun/The-Power-to-Change-Solar-and-Wind-Cost-Reduction-Potential-to-2025>>

JENSEN, P. A. et al. 10 Questions Concerning Sustainable Building Renovation. **Building and Environment**, v. 143, n. May, p. 130–137, 2018.

JONES, P. et al. Five energy retrofit houses in South Wales. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 335–342, 2017.

KARÁSEK, J. et al. Cost optimum calculation of energy efficiency measures in the Czech Republic. **Energy Policy**, v. 123, n. August, p. 155–166, 2018.

KAYNAKLI, O. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 415–425, 2012.

KRARTI, M.; DUBEY, K.; HOWARTH, N. Evaluation of building energy efficiency investment options for the Kingdom of Saudi Arabia. **Energy**, v. 134, p. 595–610, 2017.

KRARTI, M.; DUBEY, K. Benefits of energy efficiency programs for residential buildings in Bahrain. **Journal of Building Engineering**, v. 18, n. February, p. 40–50, 2018.

- LACCHINI, C.; RÜTHER, R. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. **Renewable Energy**, v. 83, p. 786–798, 2015.
- LIANG WONG, I.; KRÜGER, E. Comparing energy efficiency labelling systems in the EU and Brazil: Implications, challenges, barriers and opportunities. **Energy Policy**, v. 109, n. June, p. 310–323, 2017.
- MITSCHER, M.; RÜTHER, R. Economic performance and policies for grid-connected residential solar photovoltaic systems in Brazil. **Energy Policy**, v. 49, p. 688–694, 2012.
- MONTENEGRO, A. A. **Avaliação do retorno do investimento em Sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 209p. Florianópolis, SC, 2013.
- MONTENEGRO, A. A.; ANTONIOLLI, A. F.; RÜTHER, R. Photovoltaic Distributed Generation in Brazil: Investment Valuation for the 27 Capital CitiesSWC2019 - Solar World Congress 2019. **Anais...**Santiago, Chile: 2019
- MORAN, P.; GOGGINS, J.; HAJDUKIEWICZ, M. Super-insulate or use renewable technology? Life cycle cost, energy and global warming potential analysis of nearly zero energy buildings (NZEB) in a temperate oceanic climate. **Energy and Buildings**, v. 139, n. 2017, p. 590–607, 2017.
- NIEMELÄ, T.; KOSONEN, R.; JOKISALO, J. Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings. **Energy and Buildings**, v. 137, p. 60–75, 2017.
- OLIVA H., S. Residential energy efficiency and distributed generation - Natural partners or competition? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. March, p. 932–940, 2017.
- OUYANG, J.; GE, J.; HOKAO, K. Economic analysis of energy-saving renovation measures for urban existing residential buildings in China based on thermal simulation and site investigation. **Energy Policy**, v. 37, n. 1, p. 140–149, 2009.
- PACHECO, M.; LAMBERTS, R. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, v. 63, n. 2013, p. 716–725, 2013.
- PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: Definition, benefits and issues. **Energy Policy**, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar** 2ª Edição. São José dos Campos - SP: 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>.
- PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 394–398, 2008.

- PINHEIRO, Fundação João. **Deficit habitacional no Brasil 2018**. Belo Horizonte. Disponível em:
<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Publicacoes/capacitacao/publicacoes/deficit-habitacionalBrasil_2015.pdf.> Acesso em 05 de jan. 2019.
- RODRIGUEZ-UBINAS, E. et al. Energy efficiency evaluation of zero energy houses. **Energy & Buildings**, v. 83, p. 23–35, 2014.
- RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011.
- SAGBANSUA, L.; BALO, F. Ecological impact & financial feasibility of Energy Recovery (EIFFER) Model for natural insulation material optimization. **Energy and Buildings**, v. 148, p. 1–14, 2017.
- SILVERO, F. et al. The path towards buildings energy efficiency in South American countries. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, n. April 2018, p. 646–665, 2019.
- SOLANGI, K. H. et al. A review on global solar energy policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 2149–2163, 2011.
- SOUZA, L. G. Estudo avalia custos de diferentes sistemas de edificação de casas. **REVISTA DA MADEIRA**. nº137. 2013.
- TOKARIK, M. S.; RICHMAN, R. C. Life cycle cost optimization of passive energy efficiency improvements in a Toronto house. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 160–169, 2016.
- TOLEIKYTE, A.; KRANZL, L.; MÜLLER, A. Cost curves of energy efficiency investments in buildings – Methodologies and a case study of Lithuania. **Energy Policy**, v. 115, n. May 2017, p. 148–157, 2018.
- TONN, B.; PERETZ, J. H. State-level benefits of energy efficiency. **Energy Policy**, v. 35, n. 7, p. 3665–3674, 2007.
- TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, n. December 2014, p. 524–541, 2015.
- TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.
- TRUONG, H.; GARVIE, A. M. Chifley Passive House: A Case Study in Energy Efficiency and Comfort. **Energy Procedia**, v. 121, p. 214–221, 2017.
- TUBELO, R. et al. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil’s moderate climates zones. **Building and Environment**, v. 133, n. November 2017, p. 213–227, 2018.

VALE, A. M. et al. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. **Energy Policy**, v. 108, n. September 2016, p. 292–298, 2017.

VILAÇA GOMES, P. et al. Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues. **Energy Policy**, v. 115, n. January, p. 199–206, 2018.

WEBER, F. S. et al. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Núcleo de Pesquisa em Construção, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ZURN, H. H. et al. Electrical energy demand efficiency efforts in Brazil, past, lessons learned, present and future: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 1081–1086, 2017.

APÊNDICE A – Propriedade dos sistemas construtivos

Segue abaixo os detalhes termoenergético dos componentes construtivos:

Planilha 1 – Propriedades térmicas dos sistemas construtivos dos modelos

Modelo	Elemento		Transmitância térmica (W/m².°C)	Capacidade térmica (kJ/m².°C)
100	Bloco cerâmico 6 furos 9x14x24	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos	2.39	150
200	Bloco de concreto 2 furos 9x19x39	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos	2.79	209
300	Bloco cerâmico 6 furos 9x14x24	Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos EPS (8 cm) Placa melamínica	0.41	125
400	Bloco cerâmico 6 furos 9x14x24	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos Lã de rocha (4 cm) Placa melamínica	0.77	195
500	Bloco de concreto 2 furos 9x19x39	Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos EPS (8 cm) Placa melamínica	0.43	228
600	Bloco de concreto 2 furos 9x19x39	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Lã de rocha (4 cm) Placa melamínica	0.81	329
11	Telha cerâmica e PVC	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Forro PVC (1 cm)	1.75	21
21	Telha cerâmica e Gesso	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Forro gesso (3 cm)	1.94	37
31	Telha cerâmica e Laje	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	2.05	238

12	Telha fibrocimento e PVC	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Forro PVC (1 cm)	1.76	16
22	Telha fibrocimento e Gesso	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Forro gesso (3 cm)	1.95	32
32	Telha fibrocimento e Laje	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	2.06	233

Fonte: Autoria Própria (2020)

APÊNDICE B – Dados de consumo e custo dos modelos

Segue abaixo os dados de todos os modelos da pesquisa:

Planilha 2 – Dados dos modelos

Modelo	Consumo Total (kWh)	Consumo com COP (2.82)	Consumo com COP (3.24)	Preço Casa (R\$) COP C	Preço Casa (R\$) COP A
11111	28565.71407	10129.68584	8816.578415	101408.1	101079.9
11112	27466.094	9739.749646	8477.189507	100197.7	99882.03
11121	28492.99515	10103.89899	8794.134305	101921.5	101594
11122	27268.75328	9669.770666	8416.281876	100700	100386.6
11131	27036.98622	9587.583767	8344.748835	103167.2	102856.5
11132	26255.1268	9310.328652	8103.434197	101984.9	101683.2
11211	28682.40843	10171.06682	8852.595194	91268.79	90939.17
11212	27763.90028	9845.354709	8569.105025	90074.38	89755.32
11221	28598.73833	10141.39657	8826.77109	91781.15	91452.49
11222	27565.59941	9775.035251	8507.901052	90576.59	90259.8
11231	27500.32811	9751.889399	8487.755588	93058.58	92742.55
11232	26786.19912	9498.65217	8267.345407	91882.3	91574.47
11311	12965.86049	4597.822869	4001.808794	108990.7	108841.6
11312	12283.56064	4355.872568	3791.22242	107817.2	107676
11321	13195.48541	4679.250146	4072.680683	109530.8	109379.1
11322	12384.03653	4391.502315	3822.233496	108345.9	108203.6
11331	12469.01101	4421.63511	3848.460188	110841.2	110697.9
11332	11842.22648	4199.371092	3655.008172	109672.7	109536.6
11411	15777.29746	5594.786334	4869.536254	112276.7	112095.4
11412	14963.44528	5306.186271	4618.34731	111091.6	110919.6
11421	15923.72884	5646.712356	4914.731124	112809.5	112626.5
11422	14972.96458	5309.561909	4621.285365	111612.2	111440.1
11431	15024.10534	5327.696929	4637.069549	114104.5	113931.9
11432	14361.50702	5092.732987	4432.563896	112932.8	112767.8
11511	12653.2611	4486.97202	3905.327499	98813.25	98667.84

11512	11996.24452	4253.987419	3702.544605	97642.03	97504.17
11521	12877.9946	4566.664753	3974.689693	99352.95	99204.96
11522	12092.54105	4288.135124	3732.265756	98170.35	98031.38
11531	12198.87652	4325.842737	3765.085345	100667.6	100527.4
11532	11579.96161	4106.369365	3574.062225	99499.71	99366.63
11611	15257.19994	5410.35459	4709.012328	102080.9	101905.6
11612	14490.16422	5138.356106	4472.272907	100899.9	100733.4
11621	15393.37968	5458.645276	4751.043111	102612.8	102435.9
11622	14501.09319	5142.231627	4475.646046	101420.7	101254
11631	14596.41105	5176.032288	4505.065139	103916.9	103749.2
11632	13964.42419	4951.923472	4310.007466	102747.9	102587.4
12111	28470.03298	10095.75638	8787.047218	101399.7	101072.5
12112	27337.93932	9694.304722	8437.635592	100186.3	99872.15
12121	28562.81346	10128.65725	8815.683166	101927.7	101599.4
12122	27220.26152	9652.575008	8401.315285	100695.7	100382.8
12131	26889.41397	9535.253182	8299.201844	103154.1	102845.1
12132	26016.30923	9225.641571	8029.725071	101963.7	101664.8
12211	28582.91529	10135.78556	8821.887435	91259.97	90931.49
12212	27621.01506	9794.686191	8525.004647	90061.72	89744.3
12221	28635.15694	10154.31097	8838.011401	91784.38	91455.3
12222	27498.55737	9751.261478	8487.209064	90570.64	90254.63
12231	27359.02665	9701.782501	8444.144028	93046.05	92731.64
12232	26554.548	9416.506384	8195.848149	91861.76	91556.6
12311	12629.99673	4478.722245	3898.14714	108960.9	108815.7
12312	11952.60014	4238.510687	3689.074116	107787.8	107650.5
12321	12922.39388	4582.409177	3988.393173	109506.6	109358.1
12322	12089.9086	4287.201631	3731.453272	108319.8	108180.9
12331	12088.53938	4286.716093	3731.030674	110807.5	110668.5
12332	11419.88306	4049.603924	3524.655267	109635.2	109504
12411	15508.06296	5499.313107	4786.439185	112252.8	112074.6
12412	14706.01848	5214.900171	4538.894593	111068.8	110899.8
12421	15751.46795	5585.626932	4861.564181	112794.2	112613.2
12422	14769.00753	5237.236713	4558.335657	111594.1	111424.4
12431	14729.21449	5223.125705	4546.053854	114078.4	113909.1
12432	14028.53859	4974.659076	4329.795862	112903.3	112742.1
12511	12310.51755	4365.431757	3799.542455	98782.86	98641.39
12512	11649.13783	4130.899939	3595.412909	97611.25	97477.38
12521	12596.50846	4466.846973	3887.811254	99328	99183.24
12522	11785.37815	4179.212111	3637.462393	98143.12	98007.68
12531	11811.41801	4188.446103	3645.499386	100633.2	100497.5
12532	11153.84152	3955.26295	3442.543679	99461.93	99333.75
12611	14993.36273	5316.795294	4627.581089	102057.5	101885.2
12612	14234.45487	5047.679033	4393.350269	100877.3	100713.7

12621	15224.91963	5398.907671	4699.049269	102597.8	102422.9
12622	14295.73001	5069.407806	4412.262349	101402.5	101238.2
12631	14313.90022	5075.851141	4417.870438	103891.9	103727.4
12632	13634.11988	4834.794282	4208.06169	102718.6	102562
21111	30092.37898	10671.05638	9287.77129	101543.5	101197.7
21112	28825.78104	10221.90817	8896.846002	100318.2	99986.95
21121	29992.99364	10635.81335	9257.096803	102054.4	101709.8
21122	28578.04611	10134.0589	8820.384601	100816	100487.6
21131	28441.18854	10085.52785	8778.144613	103291.7	102964.8
21132	27678.207	9814.967023	8542.656483	102111.1	101793
21211	30535.17528	10828.07634	9424.436816	91433.04	91082.13
21212	29453.12314	10444.36991	9090.470104	90224.14	89885.66
21221	30415.0676	10785.48497	9387.366544	91942.17	91592.64
21222	29205.51891	10356.56699	9014.049045	90721.97	90386.34
21231	29211.32422	10358.62561	9015.84081	93210.26	92874.57
21232	28491.92012	10103.51777	8793.802506	92033.51	91706.08
21311	14547.22663	5158.591002	4489.884761	109130.8	108963.7
21312	13712.33827	4862.5313	4232.203168	107943.9	107786.3
21321	14770.5688	5237.790353	4558.81753	109670.4	109500.7
21322	13781.22827	4886.960381	4253.465516	108469.7	108311.4
21331	13778.59431	4886.026352	4252.652566	110957.3	110798.9
21332	13177.22313	4672.774159	4067.044176	109791	109639.6
21411	17540.32508	6219.973433	5413.680581	112433	112231.4
21412	16556.25889	5871.013789	5109.956446	111232.8	111042.5
21421	17662.6593	6263.354363	5451.438057	112963.6	112760.7
21422	16523.72631	5859.477415	5099.915528	111749.7	111559.8
21431	16509.30714	5854.364235	5095.465168	114236.2	114046.5
21432	15853.66997	5621.868782	4893.108014	113065.1	112882.9
21511	14280.48364	5064.00129	4407.556678	98957.5	98793.39
21512	13472.88207	4777.617756	4158.296936	97772.93	97618.1
21521	14498.66395	5141.370195	4474.896281	99496.63	99330.01
21522	13543.62449	4802.70372	4180.131015	98298.99	98143.34
21531	13564.51922	4810.1132	4186.580007	100788.6	100632.7
21532	12975.6631	4601.29897	4004.834289	99623.44	99474.33
21611	17159.82174	6085.04317	5296.241277	102249.6	102052.4
21612	16223.73038	5753.095881	5007.324193	101053.6	100867.2
21621	17274.63801	6125.758159	5331.678398	102779.5	102581
21622	16189.01027	5740.783785	4996.608109	101570.3	101384.3
21631	16211.97294	5748.926575	5003.695352	104060.1	103873.8
21632	15576.32754	5523.520405	4807.508501	102890.8	102711.8
22111	29940.82058	10617.31226	9240.994007	101530	101186
22112	28586.4828	10137.05064	8822.988518	100297	99968.48
22121	29980.69884	10631.45349	9253.302112	102053.4	101708.8
22122	28401.47207	10071.444	8765.886442	100800.4	100474

22131	28125.77228	9973.678113	8680.793913	103263.7	102940.5
22132	27251.80211	9663.759613	8411.050034	102073.3	101760.1
22211	30354.54697	10764.02375	9368.687337	91417.03	91068.19
22212	29199.83989	10354.55315	9012.296264	90201.68	89866.12
22221	30370.47551	10769.67217	9373.603554	91938.22	91589.2
22222	29017.00894	10289.71948	8955.866957	90705.26	90371.79
22231	28914.94821	10253.52773	8924.36673	93183.99	92851.7
22232	28093.65633	9962.289479	8670.881584	91998.21	91675.35
22311	14061.28456	4986.271122	4339.902643	109087.8	108926.2
22312	13211.28009	4684.851094	4077.555582	107899.4	107747.6
22321	14344.98047	5086.872507	4427.463108	109632.7	109467.8
22322	13300.09551	4716.345927	4104.967751	108427.1	108274.2
22331	13208.64149	4683.915421	4076.7412	110906.8	110755
22332	12551.78545	4450.987749	3874.007856	109735.6	109591.3
22411	17167.5311	6087.776985	5298.620709	112400	112202.7
22412	16145.30373	5725.285012	4983.118437	111196.4	111010.8
22421	17378.53057	6162.599495	5363.744004	112938.4	112738.7
22422	16150.20822	5727.024192	4984.632167	111716.6	111531
22431	16023.58288	5682.121587	4945.55027	114193.1	114009
22432	15298.5429	5425.015213	4721.7725	113015.9	112840.1
22511	13791.14081	4890.475465	4256.524942	98914.12	98755.64
22512	12971.85384	4599.94817	4003.658592	97728.52	97579.44
22521	14068.59809	4988.86457	4342.159903	99458.5	99296.83
22522	13062.33256	4632.032822	4031.584122	98256.32	98106.21
22531	13004.63573	4611.572955	4013.776461	100739	100589.5
22532	12362.48306	4383.859242	3815.581192	99569.08	99427.01
22611	16792.23044	5954.691646	5182.787174	102217	102024
22612	15808.72578	5605.931128	4879.236352	101016.8	100835.2
22621	16989.73745	6024.729592	5243.746126	102754.3	102559
22622	15814.58421	5608.008584	4881.044508	101537.1	101355.4
22631	15738.46494	5581.015936	4857.550907	104018.2	103837.3
22632	15036.53657	5332.105168	4640.90635	102843	102670.2
31111	31670.42703	11230.64788	9774.823157	101683.4	101319.4
31112	30490.42712	10812.2082	9410.625654	100465.8	100115.4
31121	31532.92138	11181.88701	9732.383142	102191	101828.6
31122	30197.03138	10708.16716	9320.071415	100959.6	100612.5
31131	29853.39938	10586.31184	9214.012153	103416.9	103073.8
31132	29089.6302	10315.4717	8978.280925	102236.2	101901.9
31211	31753.28885	11260.03151	9800.397794	91541.03	91176.12
31212	30757.64518	10906.96638	9493.100364	90339.79	89986.32
31221	31598.871	11205.2734	9752.737962	92047.12	91683.99
31222	30470.58394	10805.17161	9404.501216	90834.12	90483.95
31231	30299.23001	10744.40781	9351.614201	93306.71	92958.51

31232	29602.12832	10497.20862	9136.459357	92131.94	91791.75
31311	14880.61545	5276.813988	4592.782545	109160.4	108989.4
31312	14148.27814	5017.119908	4366.752512	107982.5	107819.9
31321	15049.01549	5336.530314	4644.757866	109695.1	109522.2
31322	14191.13082	5032.315893	4379.978648	108506.1	108343
31331	14156.48022	5020.028447	4369.284019	110990.8	110828.1
31332	13585.78301	4817.653549	4193.142904	109827.2	109671.1
31411	17978.36037	6375.305097	5548.876658	112471.8	112265.2
31412	17102.18	6064.602836	5278.450617	111281.2	111084.7
31421	18047.68509	6399.888329	5570.273175	112997.8	112790.4
31422	17042.10795	6043.300691	5259.909861	111795.6	111599.8
31431	16976.51192	6020.039687	5239.664172	114277.6	114082.5
31432	16343.97719	5795.736592	5044.437404	113108.6	112920.7
31511	14516.72418	5147.774532	4480.470426	98978.45	98811.62
31512	13810.4937	4897.33819	4262.498054	97802.86	97644.15
31521	14680.30477	5205.781834	4530.958263	99512.73	99344.03
31522	13854.71479	4913.019427	4276.146539	98326.57	98167.35
31531	13851.06708	4911.725914	4275.020703	100814	100654.8
31532	13290.27101	4712.862059	4101.935496	99651.33	99498.6
31611	17397.48402	6169.320576	5369.593834	102270.7	102070.7
31612	16556.51361	5871.104117	5110.035065	101083.1	100892.9
31621	17457.63842	6190.651921	5388.160005	102795.8	102595.1
31622	16494.89463	5849.253416	5091.016862	101597.4	101407.9
31631	16481.12314	5844.369907	5086.766401	104084	103894.6
31632	15873.68081	5628.964825	4899.2842	102917.2	102734.8
32111	31475.56729	11161.54868	9714.681262	101666.1	101304.4
32112	30228.76443	10719.42001	9329.865565	100442.6	100095.2
32121	31464.39467	11157.58676	9711.232922	102184.9	101823.3
32122	30004.53609	10639.90641	9260.659287	100942.5	100597.7
32131	29514.82058	10466.24843	9109.512526	103386.9	103047.7
32132	28662.46223	10163.9937	8846.438961	102198.3	101868.9
32211	31529.26948	11180.59202	9731.256013	91521.17	91158.83
32212	30478.69309	10808.04719	9407.004039	90315.06	89964.8
32221	31490.26499	11166.76063	9719.217589	92037.49	91675.61
32222	30259.46528	10730.30684	9339.341136	90815.4	90467.66
32231	29970.63723	10627.88554	9250.196674	93277.58	92933.16
32232	29188.92707	10350.68336	9008.928107	92095.3	91759.87
32311	14403.92902	5107.77625	4445.657106	109118.1	108952.6
32312	13684.39681	4852.622983	4223.579263	107941.4	107784.1
32321	14625.63664	5186.395971	4514.085382	109657.6	109489.5
32322	13741.62218	4872.915668	4241.241415	108466.2	108308.3
32331	13607.82931	4825.471387	4199.947318	110942.2	110785.8
32332	13001.93966	4610.616902	4012.944341	109775.5	109626
32411	17590.91843	6237.914337	5429.295812	112437.5	112235.3

32412	16696.07136	5920.592681	5153.108444	111245.2	111053.3
32421	17738.11323	6290.111076	5474.726307	112970.3	112766.5
32422	16666.86192	5910.234723	5144.093185	111762.4	111570.8
32431	16478.92512	5843.590469	5086.088001	114233.5	114044.1
32432	15804.90385	5604.575833	4878.056744	113060.8	112879.1
32511	14036.97396	4977.65034	4332.39937	98935.92	98774.6
32512	13344.69211	4732.160323	4118.732133	97761.57	97608.21
32521	14255.76253	5055.234941	4399.926708	99475.1	99311.27
32522	13404.66085	4753.425832	4137.241002	98286.67	98132.62
32531	13309.20716	4719.577006	4107.779987	100766	100613
32532	12713.59168	4508.365845	3923.948051	99600.21	99454.11
32611	17000.11396	6028.409205	5246.948752	102235.4	102040.1
32612	16147.6098	5726.102767	4983.830186	101046.9	100861.3
32621	17138.42169	6077.454499	5289.636324	102767.5	102570.5
32622	16121.34436	5716.788781	4975.723569	101564.3	101379.1
32631	15995.94253	5672.320047	4937.0193	104041	103857.2
32632	15341.00646	5440.073214	4734.878538	102870	102693.7
41111	24834.28629	8806.484502	7664.903177	101077.3	100791.9
41112	23735.49062	8416.840646	7325.76871	99866.95	99594.18
41121	24822.70643	8802.378167	7661.329146	101596.1	101310.8
41122	23570.62168	8358.376482	7274.883234	100372.1	100101.2
41131	23495.74182	8331.823341	7251.772167	102853.3	102583.2
41132	22775.19279	8076.3095	7029.380491	101676.4	101414.7
41211	25097.15419	8899.700068	7746.035244	90950.94	90662.53
41212	24166.18196	8569.568071	7458.698135	89755.44	89477.72
41221	25058.3927	8885.954858	7734.071821	91467.29	91179.32
41222	24003.09197	8511.734743	7408.361721	90260.76	89984.92
41231	24048.64797	8527.889353	7422.422214	92752.58	92476.21
41232	23395.9162	8296.424186	7220.961791	91581.74	91312.87
41311	12610.27436	4471.728496	3892.059987	108959.1	108814.2
41312	11881.41672	4213.26834	3667.103926	107781.5	107645
41321	12878.2917	4566.770106	3974.781388	109502.7	109354.7
41322	12005.71564	4257.345972	3705.46779	108312.3	108174.4
41331	12108.76189	4293.887196	3737.272189	110809.3	110670.1
41332	11506.8859	4080.455992	3551.507993	109642.9	109510.7
41411	14928.87255	5293.926438	4607.676714	112201.5	112029.9
41412	14088.7047	4995.994576	4348.365649	111014	110852.1
41421	15107.1443	5357.14337	4662.698859	112737.1	112563.5
41422	14122.21542	5007.877807	4358.708462	111536.8	111374.5
41431	14212.93802	5040.048942	4386.709264	114032.6	113869.3
41432	13588.96773	4818.782884	4194.125843	112864.3	112708.2
41511	12395.69761	4395.63745	3825.832596	98790.41	98647.96
41512	11691.22815	4145.825586	3608.403751	97614.99	97480.63

41521	12661.78328	4489.994072	3907.957804	99333.79	99188.28
41522	11814.22118	4189.440134	3646.364561	98145.67	98009.9
41531	11936.98266	4232.972574	3684.253907	100644.3	100507.2
41532	11343.3505	4022.464716	3501.034105	99478.73	99348.38
41611	14618.86562	5183.994901	4511.995562	102024.3	101856.3
41612	13822.38742	4901.555824	4266.168958	100840.7	100681.9
41621	14787.50168	5243.794921	4564.043727	102559.1	102389.1
41622	13852.07695	4912.084025	4275.332392	101363.2	101204
41631	13976.57066	4956.230731	4313.756377	103862	103701.4
41632	13372.66162	4742.078587	4127.364697	102695.5	102541.8
42111	24788.06375	8790.093527	7650.636958	101073.2	100788.4
42112	23622.24066	8376.681086	7290.815019	99856.91	99585.44
42121	24913.77471	8834.671884	7689.436639	101604.2	101317.9
42122	23531.70927	8344.577756	7262.873232	100368.7	100098.2
42131	23356.13667	8282.317968	7208.684157	102840.9	102572.5
42132	22539.95111	7992.890466	6956.775035	101655.5	101396.5
42211	25031.0546	8876.260498	7725.634137	90945.08	90657.43
42212	24041.14712	8525.229474	7420.107135	89744.35	89468.07
42221	25120.26569	8907.895634	7753.168422	91472.78	91184.09
42222	23947.47017	8492.010698	7391.194497	90255.83	89980.63
42231	23921.18291	8482.688974	7383.081144	92741.28	92466.38
42232	23177.01888	8218.801022	7153.400889	91562.33	91295.98
42311	12277.63806	4353.772361	3789.394462	108929.6	108788.5
42312	11534.38844	4090.208665	3559.996431	107750.8	107618.2
42321	12613.08048	4472.723574	3892.926074	109479.2	109334.2
42322	11688.72541	4144.93809	3607.6313	108284.2	108149.9
42331	11714.30433	4154.008629	3615.526029	110774.3	110639.7
42332	11055.24217	3920.29864	3412.11178	109602.9	109475.8
42411	14701.23483	5213.203842	4537.418158	112181.3	112012.4
42412	13826.94132	4903.17068	4267.574481	110990.8	110831.9
42421	14974.35687	5310.055627	4621.715083	112725.3	112553.2
42422	13907.1869	4931.626561	4292.341637	111517.7	111357.9
42431	13917.90258	4935.426445	4295.648943	114006.5	113846.5
42432	13223.2542	4689.097235	4081.251297	112831.9	112679.9
42511	12061.65516	4277.182681	3722.733075	98760.8	98622.19
42512	11339.60526	4021.136618	3499.878168	97583.81	97453.5
42521	12392.8641	4394.632658	3824.958055	99309.95	99167.53
42522	11491.05673	4074.84281	3546.622446	98117.02	97984.97
42531	11536.74224	4091.043346	3560.722912	100608.9	100476.3
42532	10893.34582	3862.888587	3362.14377	99438.84	99313.65
42611	14394.06403	5104.278025	4442.612355	102004.4	101839
42612	13560.23369	4808.593508	4185.257312	100817.5	100661.7
42621	14653.40306	5196.24222	4522.655265	102547.2	102378.8
42622	13634.99389	4835.104216	4208.331447	101343.9	101187.2

42631	13685.17874	4852.900263	4223.820599	103836.1	103678.9
42632	13006.66751	4612.293444	4014.403553	102663	102513.5

Fonte: Autoria Própria (2020)